



MÉMOIRE
PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN INGÉNIERIE

PAR

Houssemeddine Feriani

**ÉTUDE DE L'ÉCOULEMENT DANS LA CLOISON D'UN FOUR HORIZONTAL
DE CUISSON D'ANODES**

Décembre 2016



A THESIS
SUBMITTED TO
THE UNIVERSITY OF QUÉBEC AT CHICOUTIMI
IN PARTIAL FULFILMENT OF THE REQUIREMENTS
FOR THE DEGREE OF MASTERS
IN ENGINEERING

by

Houssemeddine Feriani

**STUDY OF THE GAS FLOW IN THE FLUE OF A HORIZONTAL ANODE BAKING
FURNACE**

December 2016

RÉSUMÉ

Les anodes de carbone sont utilisées dans le procédé d'électrolyse pour la production de l'aluminium primaire. Cette étape contribue à environ 15% du coût total de production de l'aluminium. Les anodes sont consommées régulièrement dans la cellule d'électrolyse et nécessitent en général un remplacement toutes les 2 à 4 semaines. L'étape la plus coûteuse de la fabrication des anodes est la cuisson où les propriétés des anodes sont fixées; donc, il s'agit d'une étape importante.

Dans ces fours, les gaz qui circulent dans les cloisons fournissent la chaleur nécessaire pour la cuisson et le profil de vitesses influence énormément la distribution de chaleur. Une distribution uniforme favorise l'homogénéité de la cuisson. Cependant, la mesure de vitesses et du débit des gaz est difficile à cause de la complexité de l'écoulement créé par la géométrie particulière des cloisons. L'objectif de ce projet est de développer une technique pour déterminer le débit du gaz dans les cloisons d'un four horizontal de cuisson d'anodes.

Une maquette d'une cloison a été conçue et construite pour tester les différentes méthodes de mesure et établir les critères sur lesquels la prise de mesure à l'usine est effectuée. Le comportement des gaz a été démontré en laboratoire par la visualisation de l'écoulement avec de la fumée et par la mesures des vitesses rencontrées dans deux configurations : une cloison issue de la littérature ayant deux rangées de briques et une autre industriel dont les détails (dimensions, géométrie) sont confidentiels. Des mesures de vitesses à l'entrée et sortie de la maquette cloison ont permis de déterminer les bilans de masse pour chaque cas de section du four de cuisson d'anodes simulé. Ces données ont aussi permis d'estimer les taux d'infiltration ou d'exfiltration selon la section étudiée.

Suivant cette même démarche, une campagne de mesure a été effectuée à l'usine d'anodes. Des mesures ont été prises dans les différentes sections du four de cuisson d'anodes, surtout la section de refroidissement compte tenu des températures relativement basses qui permettent d'effectuer des mesures convenables. Ces données ont été donc recueillies (ΔP , emplacement des mesures, températures et vitesses d'écoulement des gaz chauds) permettant ainsi de faire une analogie avec les données déjà obtenus avec les travaux sur la maquette cloison pour cette configuration. Cette analogie a permis de comparer l'écoulement des gaz chauds au niveau de l'usine et de l'air au niveau de la maquette. Cette comparaison est essentielle pour déterminer les facteurs de correspondance entre l'usine et le laboratoire compte tenu de la différence substantielle des paramètres opératoires. En utilisant ces facteurs de correspondance, l'écoulement des gaz chauds a été calculé dans les sections du four de cuisson d'anodes où on a pu prendre des mesures. Ces résultats sont présentés dans ce mémoire.

ABSTRACT

Carbon anodes are used in the electrolytic process for the production of primary aluminum. This step constitutes approximately 15% of the total cost of aluminum production. The anodes are regularly consumed in the electrolysis cell, and they are generally changed every 2 to 4 weeks. The most costly step of the anode manufacturing process is the baking process where the anode attains its final properties; thus, this is an important step.

In these furnaces, the gas that circulates in the flues provides the heat necessary for the baking, and the velocity profile affects significantly the distribution of heat. A uniform distribution promotes homogeneous heating. However, the measurement of the velocities and the gas flow rate is difficult because of the complexity of the flow created by the particular geometry of the flues. The objective of this project is to develop a technique to measure the gas flow rate in the flues of a horizontal anode baking furnace.

A physical model of a flue was designed and built to test different methods of measurement and to establish the criteria on which the measurements can be carried out in the plant. The gas behavior was characterized in the laboratory by flow visualization with fume. The velocity measurements were carried out in two different configurations: a flue from the literature with two rows of bricks and an industrial flue for which the details (dimensions, geometry) are confidential. The measurements at the entrance and exit of the model were used to determine the mass balance for each case section of the simulated anode baking furnace. These data were also used to estimate the rate of infiltration or exfiltration depending on the section studied.

Following this same approach, a measurement campaign was carried out in an anode plant. Measurements were taken in different sections of the anode baking furnace, particularly the cooling section given the relatively low temperatures, which makes the measurement of velocities possible. These data were thus collected (ΔP , measurement location, temperatures, and flow rates of the hot gases), and an analogy was assumed with the physical model of the flue. This analogy was used to compare the flow of hot gas at the plant and the air in the model. This comparison is essential for determining the corresponding factors between the plant and the laboratory given the substantial difference in the operating parameters. These factors were used to calculate the flow in the industrial flues where the measurements were done. In this thesis, these results are presented.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	ii
ABSTRACT	iv
LISTE DES TABLEAUX.....	ix
LISTE DES FIGURES	xi
REMERCIEMENTS	xv
Chapitre 1 Introduction	1
<i>1.1 Généralités.....</i>	<i>1</i>
1.1.1 Production de l'aluminium.....	1
1.1.2 Production d'anodes.....	3
<i>1.2 Problématique.....</i>	<i>5</i>
<i>1.3 Objectifs</i>	<i>7</i>
<i>1.4 Aperçu du mémoire</i>	<i>8</i>
Chapitre 2 Recherche bibliographique.....	10
2.1 Introduction.....	10
2.2 Le four de cuisson des anodes	10
2.2.1 Section de refroidissement	13
2.2.2 Section de chauffage	14
2.2.3 Section de préchauffage	15
2.3 Évolution du design de la cloison dans un four de cuisson d'anodes : modélisation physique	16
2.4 Évolution du design de la cloison dans un four de cuisson d'anodes : modélisation mathématique.....	20
2.4.1 Développements récents du design des fours de cuisson d'anodes.....	20
2.4.2 Étude du comportement d'un four horizontal de cuisson d'anodes	23
2.5 Importance de l'optimisation/amélioration du four de cuisson d'anodes	26

2.5.1	Analyse des briques réfractaires utilisées dans les fours de cuisson et diminution des couts de maintenance	26
2.5.2	Consommation de l'énergie spécifique dans les fours de cuisson d'anodes.....	28
2.5.3	Amélioration thermomécanique du mur de cloison	29
2.6	<i>Techniques de mesure de vitesse</i>	31
2.6.1	Tube de Pitot	31
2.6.2	Anémomètre à fils chaud	33
2.6.3	Vitesse déduite des particules visibles entraînées par le flux.....	35
2.6.4	Équipements mécaniques rotatifs (anémomètre rotatif à coupelles, rotor de Savonius, héliomètre ou encore turbidimètre)	35
2.6.5	Électromètre magnétique	37
2.7	<i>Conclusions</i>	37
Chapitre 3	Méthodologie	38
3.1	<i>Introduction</i>	38
3.2	<i>Méthodologie à l'échelle du laboratoire</i>	40
3.2.1	Développement du système maquette cloison	40
3.2.2	Visualisation de l'écoulement	46
3.2.3	Simulation de l'écoulement.....	47
3.3	<i>Méthodologie à l'échelle industriel</i>	56
3.3.1	Méthodologie de mesure à l'usine	56
3.3.2	Méthodologie d'analyse des données de l'usine	59
Chapitre 4	Résultats et discussion	62
4.1	<i>Introduction</i>	62
4.2	<i>Visualisation de l'écoulement</i>	63
4.3	<i>Comparaison des contours de vitesse par la modélisation mathématique</i>	66
4.4	<i>Choix du nombre de prise de mesure par point</i>	68
4.5	<i>Champs de vitesse pour les deux maquettes cloison</i>	69

4.6	<i>Bilans de masse pour les différentes sections du four (maquette de configuration 2)</i>	71
4.6.1	Résultats pour la section de préchauffage 1	73
4.6.2	Résultats pour la section de préchauffage 2	79
4.6.3	Résultats pour la section de refroidissement 6	86
4.6.4	Résultats pour la section de refroidissement 4	88
4.7	<i>Résultats des tests à l'usine et bilans de masse</i>	90
4.7.1	Analyse des données pour la section de préchauffage 1	90
4.7.2	Analyse des données pour la section de refroidissement 2	94
4.7.3	Analyse des données pour la section de refroidissement 4	98
4.7.4	Analyse des résultats pour la section de refroidissement 5	105
4.7.5	Analyse des résultats pour la section de refroidissement 6	112
4.8	<i>Conclusions</i>	120
Chapitre 5	Conclusions et recommandations	121
5.1	<i>Conclusions</i>	121
5.2	<i>Recommandations</i>	122
Références	124

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Composition chimique des briques réfractaires [21]	26
Tableau 3.1: Cas étudiés pour la détermination des bilans massiques	55
Tableau 4.2 : Données obtenus à l'usine pour la section de préchauffage 1	91
Tableau 4.3 : Détermination des facteurs de correspondance – Section de préchauffage 1	92
Tableau 4.4 : Détermination des facteurs de correspondance en considérant la position exacte de mesure de vitesse – Section de préchauffage 1	93
Tableau 4.5: Estimation des débits et du débit global entrant dans la section de préchauffage 1	94
Tableau 4.8 : Données obtenus à l'usine pour la section de refroidissement 2	95
Tableau 4.9 : Détermination des facteurs de correspondance – Section de Refroidissement 2....	96
Tableau 4.10 : Détermination des facteurs de correspondance en considérant la position exacte de mesure de vitesse – Section de refroidissement 2.....	97
Tableau 4.11 : Estimation des débits et du débit global entrant dans la section de refroidissement 2.....	98
Tableau 4.12 : Calcul de la vitesse moyenne de l'écoulement à la sortie des ouvreaux – Section de refroidissement 4.....	100
Tableau 4.13 : Détermination des facteurs de correspondance – Section de Refroidissement 4	101
Tableau 4.14 : Détermination des facteurs de correspondance en considérant la position exacte de mesure de vitesse – Section de refroidissement 4.....	102
Tableau 4.15 : Calcul de la vitesse moyenne de l'écoulement à la sortie des ouvreaux – Section de refroidissement 5	107
Tableau 4.16 : Détermination des facteurs de correspondance – Section de Refroidissement 5	108
Tableau 4.17 : Détermination des facteurs de correspondance en considérant la position exacte de mesure de vitesse – Section de refroidissement 5.....	109
Tableau 4.18 : Calcul de la vitesse moyenne de l'écoulement à la sortie des ouvreaux – Section de refroidissement 6.....	115
Tableau 4.19 : Détermination des facteurs de correspondance – Section de Refroidissement 6	116
Tableau 4.20 : Détermination des facteurs de correspondance en considérant la position exacte de mesure de vitesse – Section de refroidissement 6.....	117

Tableau 4.21: Estimation des débits et du débit global entrant dans la section de refroidissement

6..... **117**

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Schéma représentatif d'une cuve d'électrolyse [5]	3
Figure 1.2 : Photo d'un four de cuisson d'anode (four de cuisson de l'usine Sohar Sultanat d'Oman) [6]	4
Figure 1.3 : Schéma représentatif d'un four type horizontal avec une cloison et une alvéole contenant des anodes crues [7]	5
Figure 2.1 : Schéma représentatif d'un four type horizontal avec une représentation des alvéoles et des cloisons [9].....	11
Figure 2.2 : Schéma caractéristique d'un four de cuisson d'anodes avec les différentes sections [9].....	13
Figure 2.3 : Maquette de la cloison à eau [11].....	18
Figure 2.4 : Courbes de cuisson mesurées à différentes sections du four [11]	19
Figure 2.5 : Lignes d'écoulement du flux gazeux et distribution de la température des anodes calculées par le modèle 3D [12].....	21
Figure 2.6 : Température du gaz dans la section de chauffage montrant la flamme à l'intérieur de la cloison calculée par le modèle 3D [12].....	21
Figure 2.7 : Arrangement typique des entretoises (avec et sans ouvertures) [12]	22
Figure 2.8 : Écoulement des gaz suivant les arrangements illustrés dans la figure 2.7 [12]	22
Figure 2.9: Comparaison entre les valeurs mesurées et celles calculées à l'intérieur d'un four de cuisson d'anodes [12]	23
Figure 2.10 : Simulation de l'écoulement dans une cloison à (a) 1 seule rangée de briques, (b) 2 rangées de briques, (c) 3 rangées de briques [10].....	24
Figure 2.11 : Variation de la vitesse d'écoulement en fonction de la fraction volumique dans la cloison [10]	25
Figure 2.12 : Déformation des briques à différentes compositions en fonction du temps [21]....	27
Figure 2.13 : Relation entre la largeur de la cloison et la consommation d'énergie en excès avec une température de la cloison de 1180°C [23].....	29
Figure 2.14: Schéma du transfert thermique des fumées jusqu'à l'anode pendant la cuisson des anodes [24].....	30

Figure 2.15 : Courbes de distribution de la température et de la pression [26]	31
Figure 2.16 : Représentation d'un tube de Pitot de type L [29].....	32
Figure 2.17 : Principe de fonctionnement d'un anémomètre à fil chaud.....	35
Figure 2.18 : Principe de fonctionnement d'un anémomètre rotatif à coupelles	36
Figure 2.19 : Représentation d'un rotor de Savonius	36
Figure 3.1 : Schéma représentatif de la maquette cloison de configuration 2(A ou B étant l'entrée ou la sortie, 1, 2, 3 ou 4 étant les ouvertures siège d'infiltration ou d'exfiltration.....	42
Figure 3.2 : Plan avec points de prises de mesures de vitesse : (a) du champ de vitesse en général, (b) des entrées et sorties et (c) agrandissement de la zone d'entrée indiquée dans (b).....	43
Figure 3.3 : Anémomètre à fil chaud utilisé pour les mesures au laboratoire	45
Figure 3.4 : Plan général de la maquette (simulation de la section refroidissement)	48
Figure 3.5 : Représentation générale du four de cuisson d'anodes indiquant la section de Refroidissement 6 [9].....	49
Figure 3.6 : Plan général de la maquette (simulation de la section chauffage)	50
Figure 3.7 : Schéma caractéristique d'un four de cuisson d'anodes avec les différentes sections indiquant les sections de chauffage 4, 5 et 6 [9]	51
Figure 3.8 : Plan général de la maquette (simulation de la section de préchauffage).....	52
Figure 3.9 : Représentation générale du four de cuisson d'anodes indiquant la section de préchauffage 1 [9]	52
Figure 3.10 : Représentation du dispositif pour la variation de l'ouverture au niveau des ouvertures de la cloison maquette.....	54
Figure 3.11 : Représentation générale du four de cuisson d'anodes indiquant les sections étudiées [9].....	57
Figure 3.12: Points de prises de mesures de vitesse pour l'entrée/sortie et au niveau des ouvertures (avec un tube de Pitot)	58
Figure 4.1 : Visualisation de l'écoulement sur la maquette cloison de configuration 1	64
Figure 4.2 : Visualisation de l'écoulement sur la maquette cloison de configuration 1 (agrandissement 1, voir la figure 4.1)	64
Figure 4.3 : Visualisation de l'écoulement sur la maquette cloison de configuration 1 (agrandissement 2, voir la figure 4.1)	65

Figure 4.4 : Visualisation de l'écoulement sur la maquette cloison de configuration 2 (géométrie issue de la référence [22])	65
Figure 4.5 : Écoulement calculé par le modèle pour la maquette [31]	67
Figure 4.6 : Écoulement calculé par le modèle pour un four industriel [31]	67
Figure 4.7 : Mesure de variances pour 5 et 3 prises de mesure de vitesse : variance par point (voir figure 3.2).....	68
Figure 4.8: Représentation du champ de vitesse pour la maquette cloison 1	70
Figure 4.9: Représentation du champ de vitesse pour la maquette cloison 2	70
Figure 4.10 : Représentation générale du four de cuisson d'anode indiquant les sections à simuler expérimentalement en utilisant la maquette [9]	71
Figure 4.11 : Résultats des bilans de masse pour les sections simulés (Préchauffage 1 en vert, Préchauffage 2 en rouge, refroidissement 6 en bleu et refroidissement 4 en jaune)	72
Figure 4.12 : Résultats de simulation de la section de préchauffage 1 avec 5% d'ouverture au niveau des ouvreaux 1, 2 et 3.....	74
Figure 4.13: Résultats de simulation de la section de préchauffage 1 avec 10% d'ouverture au niveau des ouvreaux 1, 2 et 3.....	75
Figure 4.14: Résultats de simulation de la section de préchauffage 1 avec 15% d'ouverture au niveau des ouvreaux 1, 2 et 3.....	77
Figure 4.15: Résultats de simulation de la section de préchauffage 1 avec 20% d'ouverture au niveau des ouvreaux 1,2 et 3.....	78
Figure 4.16 : Variation du taux d'infiltration en fonction du pourcentage d'ouverture des ouvreaux - Section préchauffage 1	79
Figure 4.17: Résultats de simulation de la section de préchauffage 2 avec 5% d'ouverture au niveau des ouvreaux.....	80
Figure 4.18 : Résultats de simulation de la section de préchauffage 2 avec 10% d'ouverture au niveau des ouvreaux.....	82
Figure 4.19 : Résultats de simulation de la section de préchauffage 2 avec 15% d'ouverture au niveau des ouvreaux.....	83
Figure 4.20 : Résultats de simulation de la section de préchauffage 2 avec 20% d'ouverture au niveau des ouvreaux.....	84

Figure 4.21 : Variation du taux d'infiltration en fonction du pourcentage d'ouverture des ouverts-Section préchauffage 2	85
Figure 4.22: Résultats de simulation de la section de refroidissement 6 avec 100% d'ouverture au niveau des ouvertures.....	87
Figure 4.23 : Résultats de simulation de la section de refroidissement 4 avec 100% d'ouverture au niveau des ouvertures	89
Figure 4.24 : Représentation générale du four de cuisson d'anodes indiquant la section de Préchauffage 1[9].....	91
Figure 4.25 : Représentation générale du four de cuisson d'anodes indiquant la section de Refroidissement 2 [9].....	94
Figure 4.26 : Points de prises de mesures de vitesse pour l'entrée/sortie et au niveau des ouvertures (avec un tube de Pitot)-Section de refroidissement 2	95
Figure 4.27 : Représentation générale du four de cuisson d'anodes indiquant la section de Refroidissement 4 [9].....	98
Figure 4.28 : Points de prises de mesures de vitesse pour l'entrée/sortie et au niveau des ouvertures (avec un tube de Pitot)-Section de refroidissement 4	99
Figure 4.29 : Représentation de la section de refroidissement 4	104
Figure 4.30 : Représentation générale du four de cuisson d'anodes indiquant la section de Refroidissement 5 [9].....	105
Figure 4.31 : Points de prises de mesures de vitesse pour l'entrée/sortie et au niveau des ouvertures (avec un tube de Pitot)-Section de refroidissement 5	106
Figure 4.32 : Représentation de la section de refroidissement 5	111
Figure 4.33 : Représentation générale du four de cuisson d'anodes indiquant la section de Refroidissement 6 [9].....	112
Figure 4.34 : Points de prises de mesures de vitesse pour l'entrée/sortie et au niveau des ouvertures (avec un tube de Pitot)-Section de refroidissement 6	114
Figure 4.35 : Représentation de la section de refroidissement 6	119

REMERCIEMENTS

Dans un premier lieu je tiens à remercier l'Aluminerie Alouette Inc. et ses collaborateurs, ingénieurs, cadres et directeur pour leur contributions financières et surtout techniques. Je remercie aussi le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG), le Développement Économique Sept-Îles (DESI), l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC) et la Fondation de l'Université du Québec à Chicoutimi (FUQAC) pour leurs contributions financières.

Je tiens à remercier tout particulièrement mon directeur Monsieur Yasar Kocafe et ma codirectrice de recherche Madame Duygu Kocafe qui est responsable de la chaire sur le carbone UQAC/Alouette, bien qu'il n'y a pas de mots pour décrire leur aide et conseils permanents et sans limite. Grâce à eux, j'ai pu en effet acquérir beaucoup de connaissance et de savoir-faire. Je remercie aussi Messieurs Dave Girard et Alexandre Morin pour leur contribution technique dans la construction des équipements durant ce projet de maîtrise.

Finalement et pas des moindres, je tiens à remercier mes parents car leur support sans failles et leur amour inconditionnel m'ont toujours permis d'aller toujours plus loin. Aussi, je remercie Madame Brigitte Morais pour son support et son aide précieuse sur tous les plans possibles et imaginables.

Mes remerciements vont aussi à mes chers collègues étudiants/chercheurs de la chaire qui, grâce à eux, mon expérience a été des plus stimulantes.

Chapitre 1

Introduction

1.1 Généralités

1.1.1 Production de l'aluminium

Plus léger que le verre ou l'acier, l'aluminium est un matériau fonctionnel et esthétique en plus d'être résistant à la corrosion. Bien qu'il est possible que la production de l'aluminium primaire va devenir de plus en plus coûteuse [1], l'aluminium présente aussi l'avantage de pouvoir être recyclé à l'infini [2]. Tout ceci en fait un matériau de choix sur tous les fronts, dont celui de l'environnement. En effet, il est largement utilisé dans de nombreuses applications comme [2]:

- *Le transport : industrie automobile, construction des avions de ligne, trains, etc.*
- *Les infrastructures et bâtiments : ponts, habitations, plafonds, portes, etc.*
- *Industrie alimentaire : canettes de boissons, boîtes, emballage, etc.*
- *Les arts en tous genres, etc.*

Ceci implique donc une industrie d'envergure majeure avec des demandes mondiales importantes. La production mondiale d'aluminium représente environ 50 millions de tonnes par an en 2015 [1]. L'aluminium est le métal non ferreux le plus consommé au monde. La moitié de la production mondiale est notamment destinée directement à l'industrie de transformation. La

Chine est le premier producteur mondial avec plus de 40% devant la Russie (9,3 %) et le Canada (7,1 %). Néanmoins, les producteurs d'aluminium sont aujourd'hui confrontés à des défis de taille comme exigences en faveur d'un meilleur rendement en matière d'environnement et d'efficacité énergétique mais aussi la dépendance vis-à-vis des fluctuations des prix du marché et concurrence féroce [1].

Afin de pouvoir utiliser l'aluminium, il doit être extrait à partir de minerais, principalement la bauxite. Celle-ci est composée jusqu'à 28% d'oxyde d'aluminium (Al_2O_3), ce qui en fait un minerai de choix pour ce type d'extraction [3]. Via le procédé Bayer, l'oxyde d'aluminium, également appelé alumine, est extraite du minerai de bauxite. Ce composé chimique pur est par la suite dissocié par électrolyse à haute température afin d'en extraire l'aluminium. En 1886, Paul Louis Toussaint Héroult et Charles Martin Hall ont introduit indépendamment cette méthode d'extraction de l'aluminium par électrolyse. Cette méthode porte aujourd'hui le nom de procédé Hall-Héroult. De nos jours, l'industrie d'aluminium primaire dans le monde utilise uniquement ce procédé [4].

Ainsi, l'aluminium primaire est donc produit à partir de l'alumine extraite de la bauxite suivant le procédé de Hall et Héroult développé en 1886 (voir la figure 1.1). Il s'agit d'un procédé par électrolyse. Il consiste en une réaction entre de l'alumine (Al_2O_3 issue de la bauxite) et l'anode cuite (constituée essentiellement de carbone), le tout baignant dans un électrolyte à environ 950°C en présence d'un courant électrique [5].

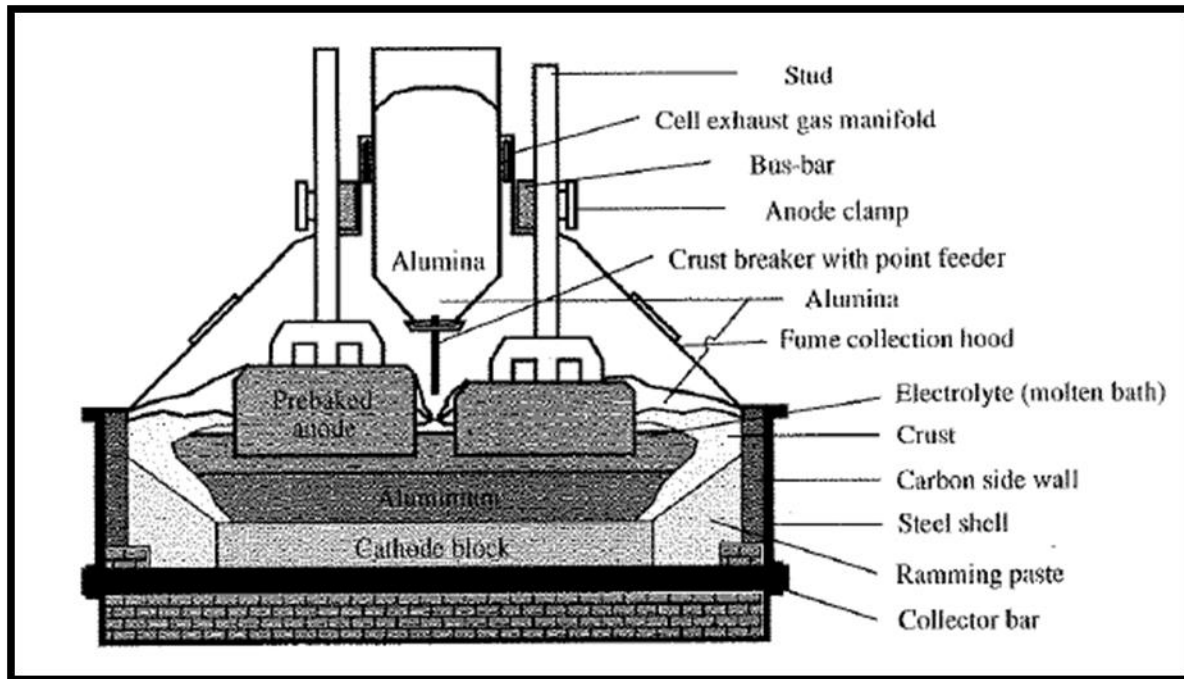


Figure 1.1 : Schéma représentatif d'une cuve d'électrolyse [5]

Cette réaction d'électrolyse bien qu'elle est l'étape la plus gourmande en consommation d'énergie, elle est néanmoins précédée par une étape tout aussi importante bien que moins coûteuse en énergie : la production des anodes nécessaires pour cette réaction d'électrolyse.

1.1.2 Production d'anodes

Compte tenu de son importance dans la réaction d'électrolyse, l'anode est donc une partie intégrante du procédé de production d'aluminium. Une optimisation et une amélioration de la production des anodes et de leur cuisson est prépondérante tant sur le plan économique qu'environnemental.

Les anodes en tant que partie essentielle pour l'électrolyse sont formées à partir de coke calciné (provenant du pétrole), de brai (provenant du goudron de houille) et d'anodes et de mégots

recyclés. Elles nécessitent en général un remplacement (dans la cellule d'électrolyse) toutes les 2 à 4 semaines dépendamment de leur taille et de leur densité [2].

Le procédé de fabrication d'anodes crues consiste en un mélange contenant ces matières premières pour ensuite passer par un vibro-compacteur dans la tour à pâte. Les anodes crues sont mises superposées dans des alvéoles des grands fours de cuisson et sont cuites (voir la figure 1.2). Des deux côtés d'une alvéole, il y a les cloisons où circulent des gaz chauds qui fournissent la chaleur nécessaire pour la cuisson des anodes (voir la figure 1.3) [6]. L'étape de cuisson permet aux anodes d'acquérir les propriétés physiques, chimiques, mécaniques, thermiques et électriques nécessaires pour la réaction d'électrolyse grâce à l'établissement de liens chimiques entre le brai et le coke [7].



Figure 1.2 : Photo d'un four de cuisson d'anode (four de cuisson de l'usine Sohar Sultanat d'Oman) [6]

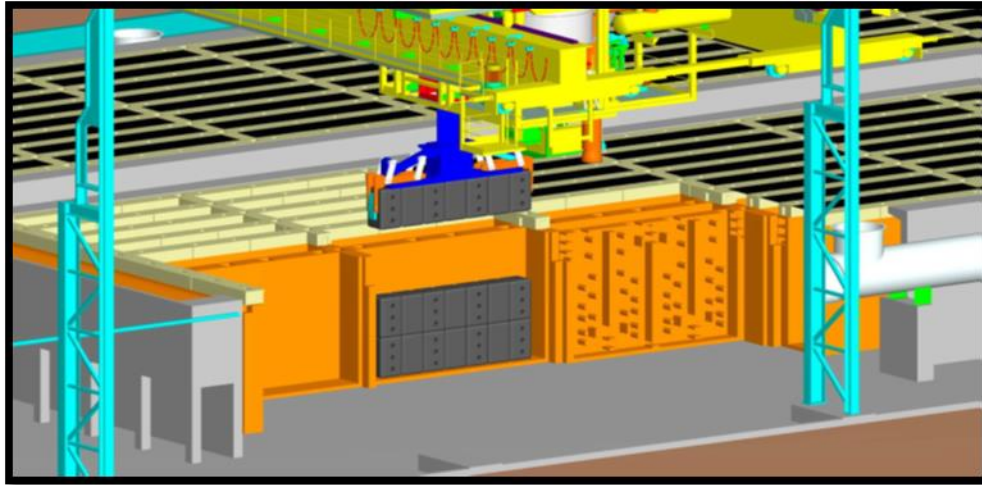


Figure 1.3 : Schéma représentatif d'un four type horizontal avec une cloison et une alvéole contenant des anodes crues [7]

En effet, en acquérant ces propriétés, les anodes ont alors une densité élevée, une bonne conductivité électrique ainsi qu'une faible résistivité. L'amélioration de ces paramètres a un impact direct sur la consommation d'énergie et le rendement final de la phase de cuisson d'anodes crues en premier plan et de la production de l'aluminium primaire d'une manière générale.

Dans un même contexte, la lumière va se porter sur l'amélioration de la cuisson des anodes en mettant le point sur le four, où cette cuisson a lieu, et son principe de fonctionnement, le tout détaillé dans la partie de revue de littérature.

1.2 Problématique

L'industrie de l'aluminium est en perpétuelle compétition entre les différents grands producteurs d'aluminium primaire. L'amélioration continue est donc indispensable pour la survie de l'industrie. La consommation des matériaux servant à la réduction de l'alumine ainsi que la perte

de rendement énergétique des cellules d'électrolyse sont à l'origine de coûts comptant parmi les plus importants au niveau de la production de métal primaire. Ajoutant à cela les nouveaux accords internationaux en matière de normes environnementales, tel que le protocole de Kyoto, qui obligent les usines de production à réduire leurs émissions et leurs résidus. Dans ce sens, il est important d'optimiser, d'améliorer (rendements, etc.) et d'innover [7].

Parmi les différentes parties que constitue le procédé de production de l'aluminium primaire, il y a l'étape de cuisson des anodes. Nombreux sont les travaux qui ont été menés afin d'améliorer la production, les paramètres opératoires pour des moindres coûts et l'impact environnemental.

L'étape de cuisson contribue à peu près à 60% du coût d'opération de la fabrication des anodes et environ 3 à 4% du coût total de production l'aluminium. Le coût d'anode constitue environ 15-18% du coût de production de l'aluminium. Si la qualité de l'anode est faible, cette contribution peut atteindre les 25% [8].

Dans cette optique, il est possible ainsi d'améliorer le rendement des cloisons dans lesquels se produit la combustion des gaz nécessaire pour la production de chaleur thermique afin de cuire les anodes.

Dans ce contexte, il existe, pour une géométrie de four de cuisson donnée, une réelle difficulté pour mesurer les vitesses et caractériser l'écoulement dans les fours de cuisson d'anodes compte tenu des conditions difficiles du milieu et de l'accès limité :

- *possibilité d'endommagement des instruments par les volatils,*
- *températures importantes limitant le choix des instruments,*
- *géométrie complexe rendant certaines zones inaccessibles,*

- *complexité de la structure de l'écoulement.*

Ces données sont pourtant importantes pour la validation des modèles mathématiques des fours ainsi que leur design et développement. Ils peuvent en effet permettre de connaître la quantité d'énergie suffisante pour la cuisson, prévenir les déformations au niveau des briques réfractaires (le mur séparant la cloison et l'alvéole) ou encore valider ces modèles dans un premier temps. Ensuite, il est à noter qu'il est d'autant plus intéressant de mesurer et confirmer s'il en existe des infiltrations néfastes à la cloison (par conséquent néfaste à l'écoulement dans celle-ci) et au procédé en général. En effet, cela permettra d'identifier quelle cloison est à remplacer après avoir atteint un rendement jugé non satisfaisant dû à un apport important d'air secondaire altérant le procédé.

L'étude de l'écoulement et de l'homogénéité de la distribution des gaz à l'intérieur de la cloison et par conséquent la distribution de la chaleur va permettre de savoir où est ce qu'il faut (selon la géométrie : configuration des briques et des entretoises) apporter plus d'énergie aux endroits ayant une basse température améliorant ainsi le transfert thermique entre les deux parties (cloison et alvéole).

1.3 Objectifs

L'objectif de ce projet est d'effectuer une caractérisation expérimentale de l'écoulement dans la cloison des fours de cuisson d'anodes (profil de vitesse) afin de développer des méthodes de mesures nécessaires.

Cette caractérisation passe d'abord par la caractérisation à l'échelle du laboratoire en simulant différentes sections avec des taux d'infiltration et d'exfiltration variables et contrôlables.

Ces données sont ensuite comparées par les données qui peuvent être mesurées au niveau de l'usine permettant ainsi de déterminer les facteurs de correspondance nécessaires pour déterminer les débits dans ces sections du four de l'usine. La validation du modèle expérimental est en effet effectuée par de la modélisation mathématique de la cloison maquette (en respectant les mêmes rapports de dimensions et paramètres opératoires au niveau du laboratoire). Cependant, compte tenu du fait que la maquette cloison est construite à partir de plexiglass, la rugosité ne peut pas être prise en considération (surface lisse). Cette rugosité caractéristique des murs de briques réfractaires peut avoir une certaine incidence (création d'une résistance) sur l'écoulement dans la cloison à l'usine. Malgré l'absence de rugosité, il est possible de connaître la distribution à l'intérieur de cette cloison à l'aide de la modélisation physique effectuée à l'échelle du laboratoire.

Ceci consiste en l'établissement d'un protocole de mesure de l'écoulement à l'échelle du laboratoire qui tient compte des paramètres conséquents mais qui sera aussi fiable et applicable à l'échelle industrielle.

1.4 Aperçu du mémoire

Suite à l'introduction qui a comme but de comprendre les différents aspects touchant de près ou de loin ce projet de recherche dans le chapitre 1, le reste du mémoire consiste en une synthèse des travaux qui ont été réalisés sur le four de cuisson d'anodes en effectuant des modélisations physiques et des mesures sur un four industriel. D'un autre côté, les travaux sur le design du four et l'amélioration de celui-ci ont une place centrale dans la partie de recherche bibliographique présentée dans le chapitre 2.

La méthodologie au niveau du laboratoire ainsi qu'à l'échelle industrielle est discutée dans le chapitre 3 afin de comprendre la manière avec laquelle les travaux ont été effectués au sein de ce projet de maîtrise.

La partie de résultats et interprétation présentée dans le chapitre 4 porte sur les travaux de comparaison de l'écoulement dans le four par modélisation physique et par modélisation mathématique ainsi que les bilans de masse pour chacune des sections simulées au niveau du laboratoire. Les résultats des prises de mesure à l'usine sont développés et ainsi comparés avec ceux du laboratoire.

Le mémoire se termine avec le chapitre 5 dans lequel les conclusions et les recommandations sont données.

Chapitre 2

Recherche bibliographique

2.1 Introduction

Dans cette partie, des travaux antérieurs de modélisation de l'écoulement dans le four (modélisation physique et mathématique) sont discutés. D'un autre côté, cette partie comporte l'énumération de certaines méthodes de mesure expérimentales de l'écoulement, et celles qui peuvent être utilisées dans le four de cuisson sont indiquées. Il existe très peu de publications sur la caractérisation de l'écoulement dans la cloison des fours de cuisson industriels (quelques modèles physiques seulement). Plusieurs articles sont publiés sur les méthodes de mesure de la vitesse, mais on trouve rarement d'application au four de cuisson.

2.2 Le four de cuisson des anodes

D'une manière générale il en existe deux types de four de cuisson d'anodes, à savoir 'vertical' et 'horizontal' qui sont différents significativement par leurs géométries. Les travaux qui ont été effectués au sein de cette maîtrise se penchent exclusivement sur le type 'horizontal'. Ce type de four est le plus communément utilisé [2, 9, 10].

Le four de cuisson d'anodes est une succession de plusieurs 'fosses' mises en série où sont introduites les anodes crues entourées de coke: ce sont les alvéoles (voir figure 2.1).

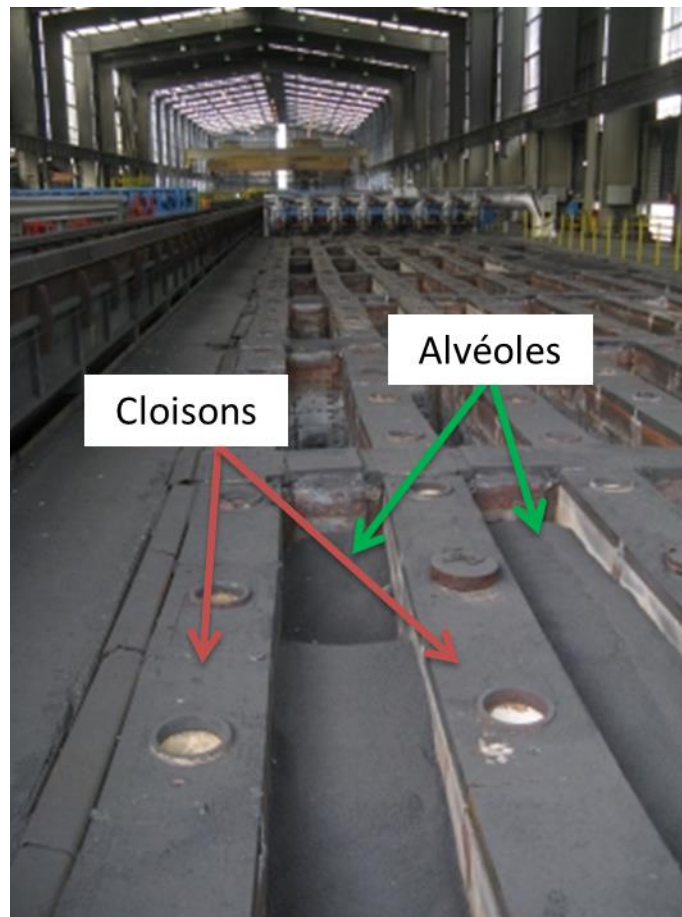


Figure 2.1 : Schéma représentatif d'un four type horizontal avec une représentation des alvéoles et des cloisons [9]

Le coke entourant les anodes crues consiste en un manteau de protection entre celles-ci (composées de carbone) et l'air ambiant (oxygène) réduisant ainsi la réaction du carbone avec l'oxygène de l'air considérée comme perte. D'un autre côté le coke de garnissage représente un milieu poreux nécessaire afin de permettre le passage des volatils durant les différentes phases de la cuisson et surtout un support mécanique pour les anodes.

En parallèle à ces alvéoles sont disposées (en série aussi) des cloisons. Ce sont des conduites où circulent les gaz chauds (pouvant atteindre plus de 1200°C) nécessaires pour la cuisson des

anodes selon un écoulement bien précis constituées de mur de briques réfractaires et ayant une géométrie qui peut varier selon la disposition des chicanes et des entretoises qui les constitues. Ces chicanes et entretoises qui les forment, leur confèrent une géométrie influençant directement l'écoulement des gaz (voir figure 2.1).

À noter que ces cloisons disposent chacune de 4 ouvreaux en haut permettant ainsi d'introduire les sondes, rampes de soufflage ou d'aspiration ainsi que des instruments pour mesurer et contrôler les paramètres d'écoulement des gaz chauds.

La figure 2.2 montre la disposition des cloisons dans les différentes sections du four à savoir (selon l'écoulement des gaz de droite à gauche, inverse au cycle de cuisson d'anode). Le fonctionnement du four peut alors être assimilé à un échangeur de chaleur à contre-courant car le sens d'écoulement des gaz ramené par les rampes de soufflage est à l'opposé du sens de cuisson des anodes. Il en existe alors, dans le four de cuisson d'anodes, 3 sections selon les phases indiquées dans la figure 2.2, à savoir : section de refroidissement, section de chauffage et section de préchauffage. En effet, les gaz initialement à température ambiante vont extraire de la chaleur aux anodes cuites (section de refroidissement) qui eux vont perdre progressivement leur chaleur accumulée au cours de la cuisson. Dans l'autre sens, les anodes non cuites sont introduites vont acquérir de la chaleur à partir des gaz déjà chauds (section de préchauffage) afin d'entamer leur cuisson.

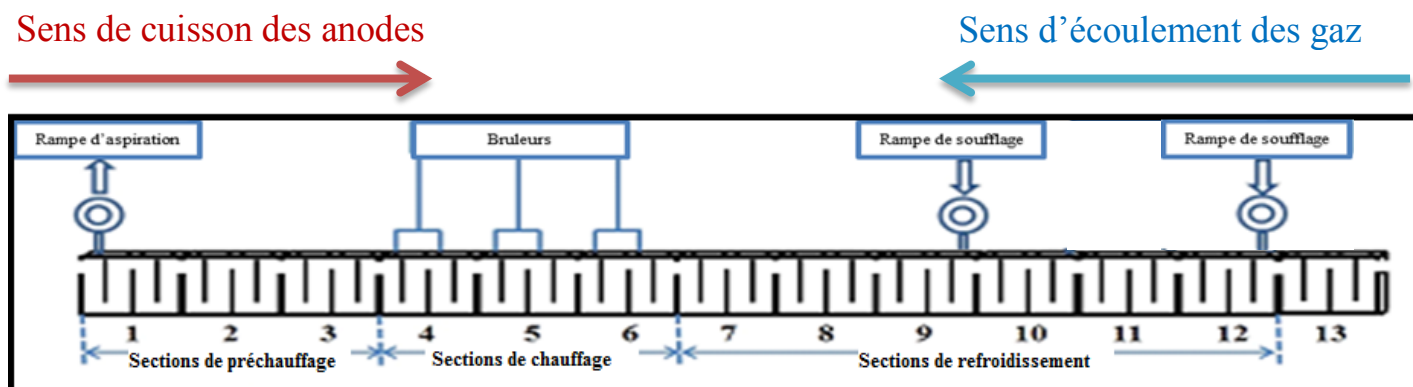


Figure 2.2 : Schéma caractéristique d'un four de cuisson d'anodes avec les différentes sections [9]

2.2.1 Section de refroidissement

Représentée par une succession d'environ 6 cloisons, c'est en effet ici où l'air ambiant est soufflé et donc introduit dans le four par deux cloisons; un soufflage forcé et un soufflage naturel. À noter que ces deux types de soufflage sont réalisés par des ventilateurs.

Le soufflage forcé (ici indiqué par la rampe au niveau de la cloison 12 à la figure 2.2) permet de rentrer l'air afin de refroidir le plus possible les anodes qui sont déjà cuites pour faciliter leur extraction et rendre possible la maintenance au niveau des alvéoles et des cloisons. Il est donc à noter qu'à ce niveau (cloisons 11 et 10) les ouvreaux sont totalement ouverts permettant à l'air de s'échapper.

Le soufflage naturel (indiqué par la rampe d'aspiration de la cloison 9 à la figure 2.2) permet de son côté non seulement de rentrer de l'air de l'extérieur afin de refroidir les anodes mais aussi de souffler de l'air afin de minimiser les pertes de charge induites par une longueur significative de la succession des cloisons (longueur du four) car l'augmentation ou la diminution de l'intensité de soufflage par cette rampe (combinée à celle d'aspiration au niveau de la section de

préchauffage) va permettre de connaître (ou changer) la position du « point zéro », point à partir duquel la pression devienne négative (moins que celle atmosphérique). À partir de cette section (où réside le refroidissement naturel et au-delà suivant le sens d'écoulement des gaz), les ouvreaux de chaque section sont fermés.

Au niveau de cette section donc, les anodes cuites sont refroidies afin de faciliter leur extraction. Au même temps, la chaleur dégagée par celles-ci commence à réchauffer l'air introduit dans le four qui passe donc par la section de chauffage [5].

2.2.2 Section de chauffage

C'est dans cette section que se produit la cuisson des anodes contenues dans les alvéoles. En effet, des brûleurs injectent les carburants par des ouvreaux en haut de chaque cloison (huiles ou gaz naturel selon l'industrie), ce qui augmente les températures des gaz jusqu'à 1200°C, voire 1300°C.

Cette énergie est ensuite transmise aux anodes par transfert thermique à travers le mur de briques réfractaires des cloisons, le coke qui entoure les anodes dans les alvéoles (coke de garnissage) et jusqu'au centre des anodes.

Le point zéro se situe au début de la section de chauffage (suivant le sens d'écoulement de l'air introduit), ce qui engendra une diminution de la pression à l'intérieur des cloisons permettant ainsi la succion des volatils dégagés lors de la cuisson. Ces volatils, bien qu'ils sont faibles dans cette section, vont constituer une source supplémentaire de carburants pour le chauffage de l'air augmentant ainsi le rendement global de combustion [5].

2.2.3 Section de préchauffage

Dans cette section, on commence par chauffer graduellement les anodes crues, ainsi les températures peuvent atteindre les 900°C. Le préchauffage graduel des anodes est ainsi caractérisé essentiellement par deux phénomènes :

- *Un dégagement graduel de volatiles tel que du H_2 , CH_4 et du goudron des anodes ainsi que par la pression négative dans la cloison (caractéristique de la section de préchauffage) qui permet d'aspirer ces volatils de l'alvéole par des interstices entre les briques et ramener une certaine quantité d'oxygène par les infiltrations de l'air ambiant. Cette quantité d' O_2 est très utile pour continuer à réaliser la combustion des volatiles (et donc préchauffer les anodes) même vers la fin de tout le cycle de cuisson d'anodes.*
- *Une aspiration par la dernière cloison de la section afin de maintenir un flux constant d'écoulement des gaz pour pallier les pertes de charges mais aussi définir selon l'intensité d'aspiration la position du point zéro (combiné avec le soufflage naturel à la section de refroidissement) au niveau du four (idéalement au début de la section de chauffage suivant le sens d'écoulement des gaz).*

Cette section est composée en général de 3 à 4 cloisons (donc 3 à 4 alvéoles) afin de pouvoir graduellement préchauffer les anodes crues. Les gaz chauds proviennent donc de la section de chauffage où il y a les brûleurs. Une cuisson graduelle permet en effet d'obtenir des anodes qui contiennent le moins possible de microfissures qui peuvent augmenter significativement la résistivité des anodes. La distribution de la vitesse du fluide à travers les cloisons affecte directement la qualité des anodes (haute résistance à l'oxydation, une haute densité, une basse

perméabilité, une basse résistance électrique spécifique, etc. [7]) compte tenu du transfert thermique entre les cloisons et les alvéoles contenant les anodes crues. La détermination des distributions de vitesses et de pression permet la caractérisation de l'écoulement dans la cloison (débits dans les différentes sections et infiltration) et une meilleure compréhension de l'écoulement, ce qui ainsi aide à améliorer la performance du four en prenant des actions correctives nécessaires.

Avec les propriétés des matières premières et les paramètres de la fabrication des anodes crues, la cuisson représente l'ultime étape déterminante affectant significativement la qualité des anodes. La géométrie de la cloison et donc l'écoulement résultant de celle-ci ont un impact important sur le procédé, la consommation d'énergie et les émissions environnementales dues à la dévolatilisation des anodes et la combustion de ces volatiles à l'étape de cuisson [5].

Dans ce contexte, une maquette de cloison a été mise en place à une échelle de 1:4 par rapport à celui de l'usine avec toutefois un allongement de la sortie du fluide afin de simuler une succession de cloisons.

2.3 Évolution du design de la cloison dans un four de cuisson d'anodes : modélisation physique

Rares sont les travaux qui en étaient menés sur la modélisation physique des cloisons des fours de cuisson d'anodes. La modélisation physique peut en effet constituer une approche intéressante surtout pour la caractérisation et la visualisation de l'écoulement d'une manière à ce que la géométrie peut être changée et réordonner. Cela peut permettre aussi d'effectuer des tests

de mesure de vitesse pour la détermination du régime d'écoulement et/ou pour prédire l'effet du changement de la géométrie.

La cloison étant constituée de briques d'entretoises et de chicanes, leur réaménagement est tout à fait possible grâce à la modélisation physique. Ainsi, il est possible de comparer les valeurs de différents paramètres testés avec ceux prédits par une modélisation mathématique.

Par souci d'amélioration de l'efficacité et de la performance des fours de cuisson d'anodes, les travaux de Keller et al. [11] ont permis de se pencher sur les deux aspects suivants :

Design optimal de cloison pour assurer un transfert de chaleur homogène :

Le but était d'avoir une distribution de vitesse régulière pour un transfert de chaleur homogène, il était possible de visualiser cette distribution grâce à un modèle horizontal de cloison dans lequel une couche d'eau s'écoule de gauche à droite afin de simuler l'écoulement réel de gaz (figure 2.3). La température de l'eau à différents endroits a été mesurée afin de déterminer cette distribution. Afin de trouver le design optimal, la maquette a été effectuée en respectant les dimensions réelles. Aussi, ce modèle est horizontal et ce afin de simplifier la construction et de visualiser l'écoulement avec des bouts de papier blanc qui suivent les lignes de courant. Dans une configuration verticale, c'est impossible d'utiliser les bouts de papier.

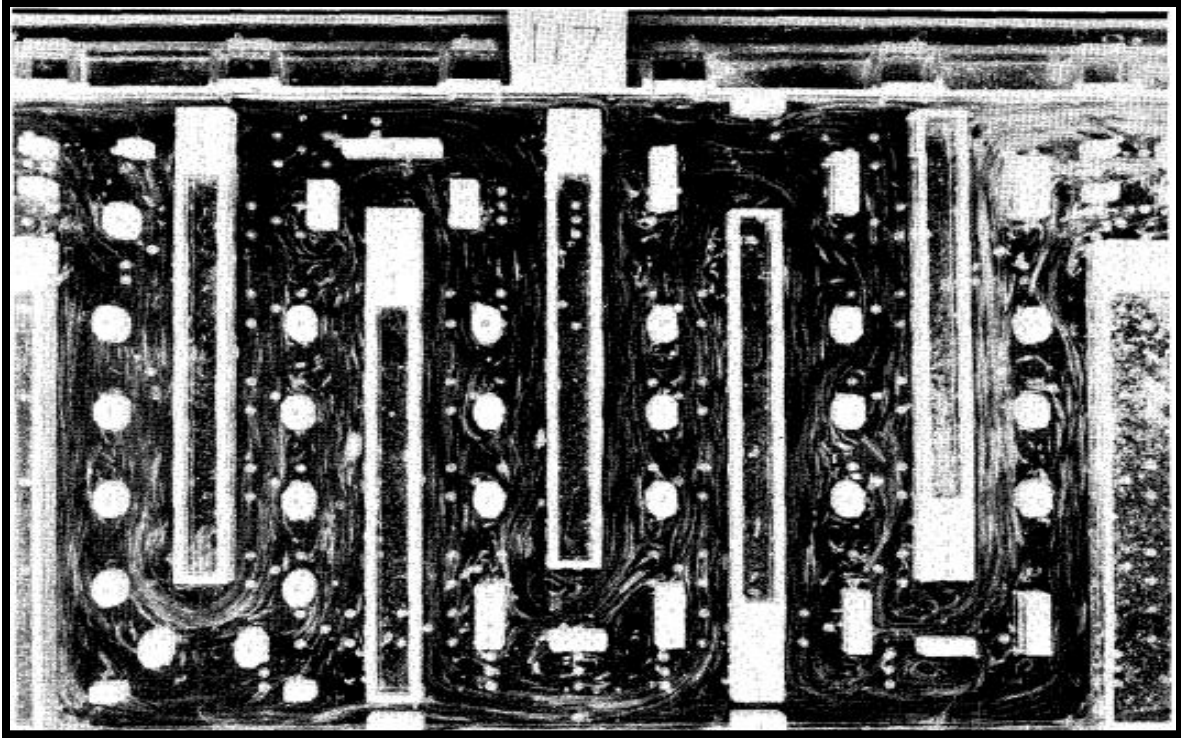


Figure 2.3 : Maquette de la cloison à eau [11]

Comme l'indique la figure 2.3, des bouts de papier blanc flottent à la surface de l'eau. Le suivi de cette méthodologie pour différentes géométries permet de comparer justement ces configurations et d'en choisir une meilleure disposition dans un délai court et pour des coûts relativement faibles. En effet, une bonne distribution de la vitesse des gaz chauds dans la cloison industrielle permet d'obtenir des anodes cuites plus homogènes et de qualité [11]. Dans ce sens, à l'issue de ces travaux il a été possible de déduire qu'un modèle à échelle réduite d'une cloison du four de cuisson d'anodes peut être utilisé afin de mettre au point un design dans lequel la distribution de la vitesse est bonne. Cependant l'utilisation de l'eau pour la simulation de l'écoulement dans une maquette cloison pourrait représenter quelques limites. L'eau est plus dense que l'air, son utilisation est difficile si l'on souhaite effectuer une modélisation physique verticale comme dans la cloison à l'usine car il faudrait avoir un débit assez important pour ne

pas tenir compte de la gravité. Aussi, l'utilisation d'un papier flottant ne peut être totalement fiable.

À noter que la maquette de la cloison mise au point dans le projet actuel de recherche s'intègre dans ce type de modélisation et de caractérisation de l'écoulement des gaz.

Influence de la géométrie sur la courbe de chauffage :

À partir des courbes de cuissons (température en fonction du temps), mesurées dans différents endroits dans le four (zone de refroidissement, chauffage et préchauffage), il est possible de remarquer qu'elles sont superposables (les 3 courbes, figure 2.4) ce qui démontre que le four peut ainsi être considéré comme un échangeur de chaleur à contre-courant [11].

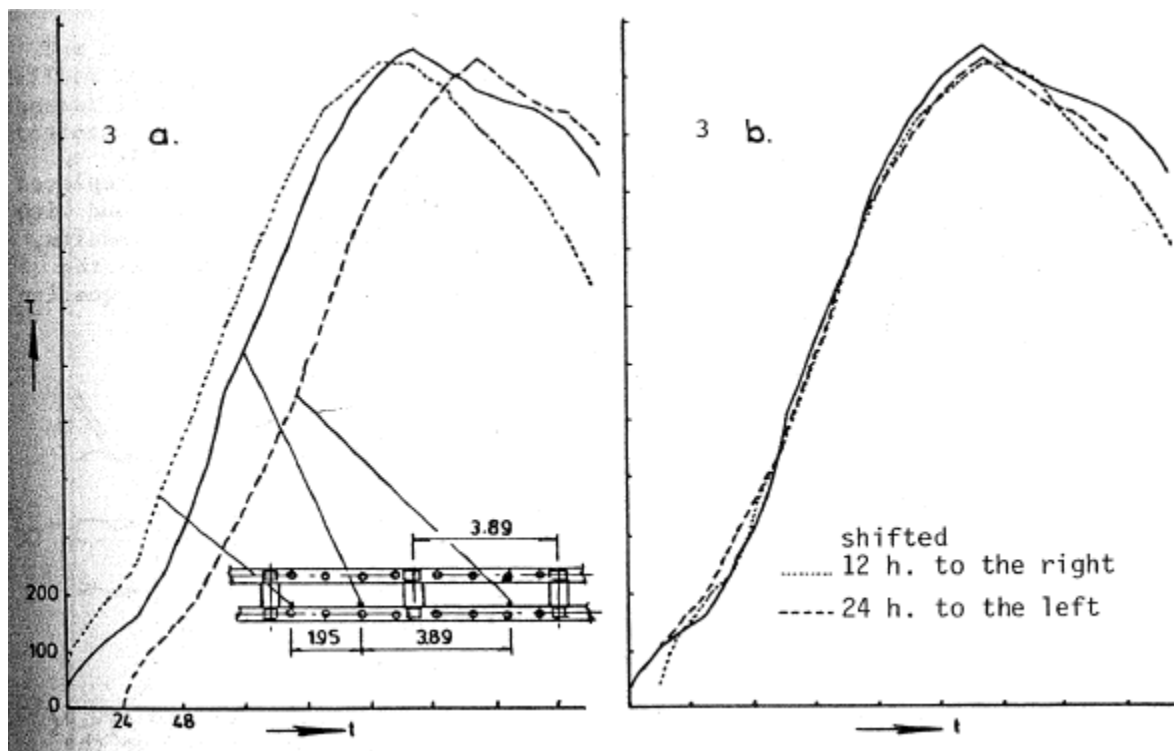


Figure 2.4 : Courbes de cuisson mesurées à différentes sections du four [11]

2.4 Évolution du design de la cloison dans un four de cuisson d'anodes : modélisation mathématique

De nos jours, on sous-estime encore l'impact de modifications qui, dans l'apparence, peuvent paraître minimes. Le design des fours se fait en ce moment essentiellement par extrapolation à partir des fours existants [5]. La modélisation mathématique cependant représente un outil incontournable pour la prédiction du comportement des fours et de la productivité des anodes cuites.

2.4.1 Développements récents du design des fours de cuisson d'anodes

Certains chercheurs se sont récemment penchés sur un nouveau design des fours qui permet entre autres [12] :

- de produire des anodes de haute et uniforme qualité,
- une production avec la capacité que peut offrir le design même à de hautes températures,
- une combustion sans encrassement,
- un faible dégagement des NO_x ,
- des coûts de maintenance réduits et longue durée de vie des murs des cloisons.

Le modèle numérique utilisé pour ce faire est une combinaison d'un modèle en trois dimensions (3D) détaillé (pour une seule section) et un modèle global de masse et d'énergie en deux dimensions (2D) pour toutes les sections (voir figures 2.5 et 2.6) [12].

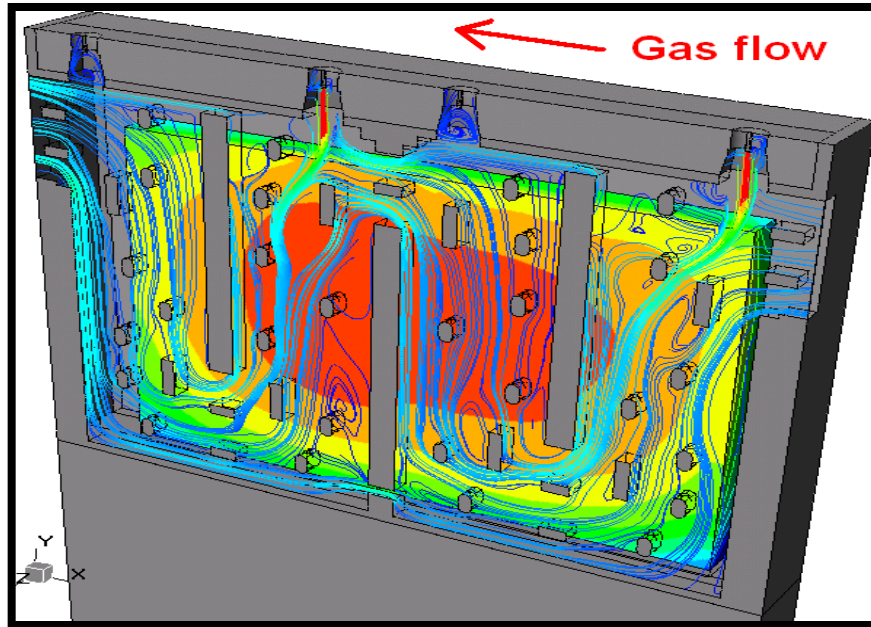


Figure 2.5 : Lignes d'écoulement du flux gazeux et distribution de la température des anodes calculées par le modèle 3D [12]

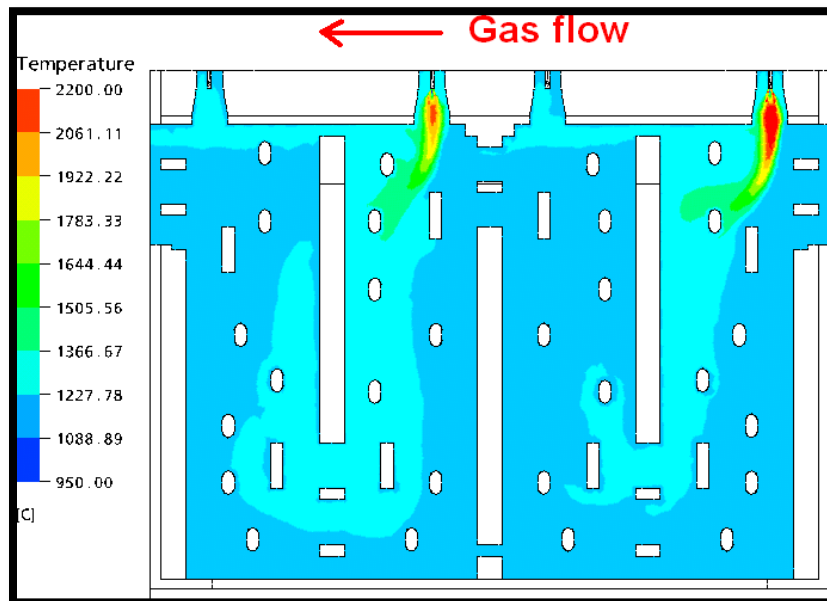


Figure 2.6 : Température du gaz dans la section de chauffage montrant la flamme à l'intérieur de la cloison calculée par le modèle 3D [12]

Dans un même temps, la lumière a été mise sur l'influence du réarrangement des briques et entretoises sur la concentration minimale en oxygène à l'intérieur de la cloison (nécessaire à la combustion) pour des niveaux de pression négative différents.

Les figures 2.7 et 2.8 aident à illustrer le réarrangement considéré pour le calcul et comparaison de l'écoulement avec et sans ouvertures au niveau des chicanes. La figure 2.8 montre l'impact des ouvertures sur le champ de vitesses dans la cloison. Un meilleur mélange des gaz est observé avec les ouvertures.

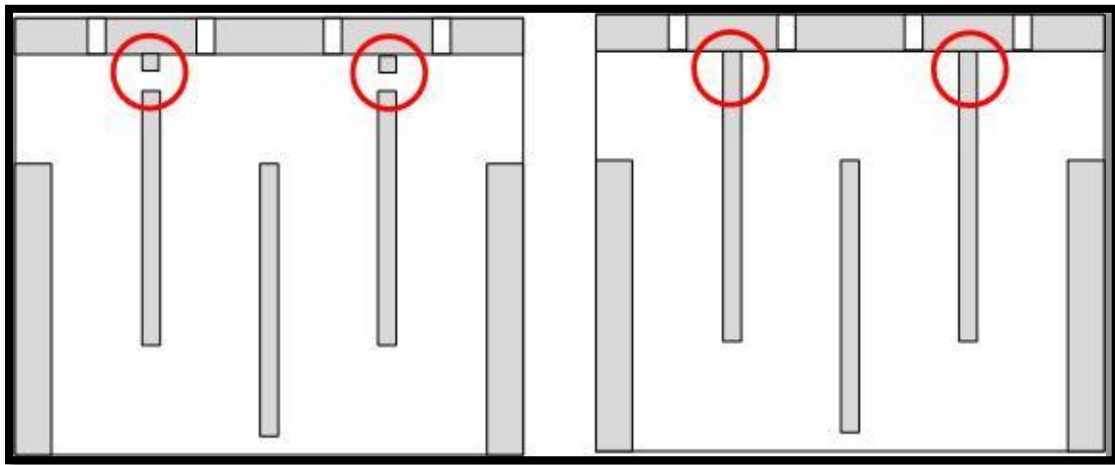


Figure 2.7 : Arrangement typique des entretoises (avec et sans ouvertures) [12]

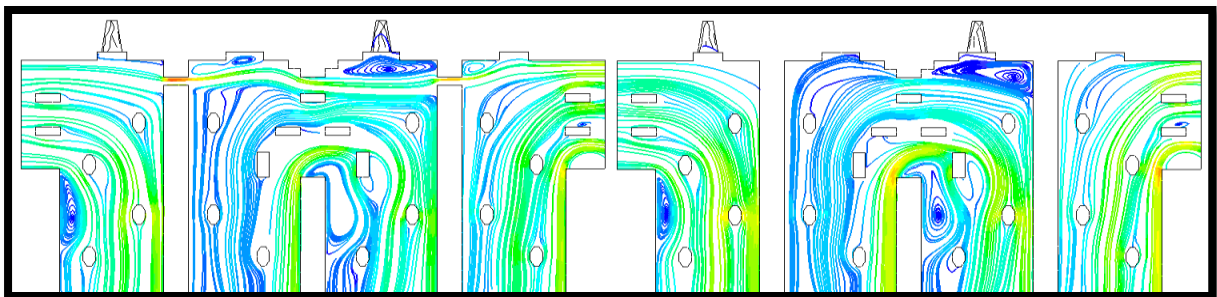


Figure 2.8 : Écoulement des gaz suivant les arrangements illustrés dans la figure 2.7 [12]

La température, étant l'un des paramètres les plus importants durant la cuisson des anodes, a pu être mesurée par un thermocouple installé à l'intérieur du coke entre le mur de la cloison et les

anodes. Il a été ainsi possible de comparer les valeurs prédites et celles mesurées directement. Le tout illustré dans la figure 2.9 qui montre une très bonne concordance.

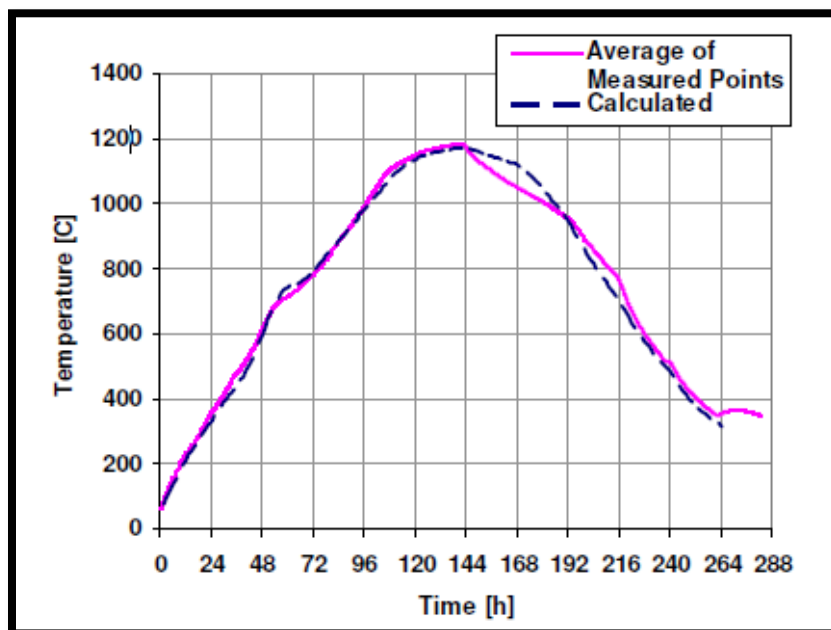


Figure 2.9: Comparaison entre les valeurs mesurées et celles calculées à l'intérieur d'un four de cuisson d'anodes [12]

2.4.2 Étude du comportement d'un four horizontal de cuisson d'anodes

Il a été prouvé à travers plusieurs travaux [10, 13-19] que la géométrie des cloisons, notamment le nombre de rangées, la répartition des entretoises et/ou chicanes, a une incidence directe sur l'uniformité de l'écoulement et la distribution de la vitesse. Appuyé par une modélisation mathématique, il a été possible de simuler l'écoulement à l'intérieur d'une cloison (en imposant une vitesse à l'entrée) afin de prédire les zones à faibles vitesses ou de zones de recirculation. Les figures 2.10a, 2.10b et 2.10c indiquent, respectivement, des simulations avec des cloisons à une seule, deux et trois rangées de briques d'une part, et la figure 2.11 indiquent l'effet de la vitesse d'écoulement sur sa variation en fonction de la fraction volumique suivant chaque cas [10].

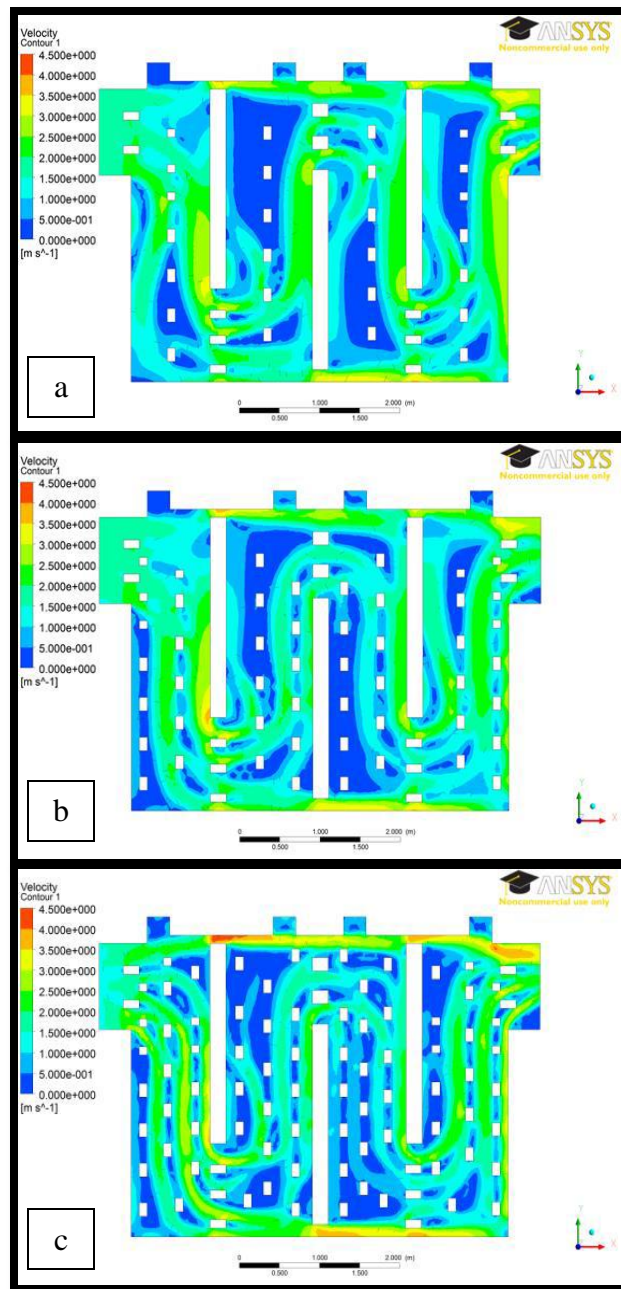


Figure 2.10 : Simulation de l'écoulement dans une cloison à (a) 1 seule rangée de briques, (b) 2 rangées de briques, (c) 3 rangées de briques [10]

Le tout a permis d'établir la distribution de la vitesse dans chaque cloison de géométrie différente (figure 2.11) et de conclure qu'avec une ou deux séries de briques (plutôt que trois) il y a une meilleure distribution grâce à une plus importante fraction volumique (pour une gamme de vitesse entre 1 m/s et 2.5m/s). Une faible vitesse diminuerait le transfert de chaleur, et une vitesse trop élevée augmenterait la perte de charge significativement. Une géométrie avec 3 séries de briques nous montre donc que l'ajout de briques ne permet pas d'améliorer la distribution de la vitesse [10].

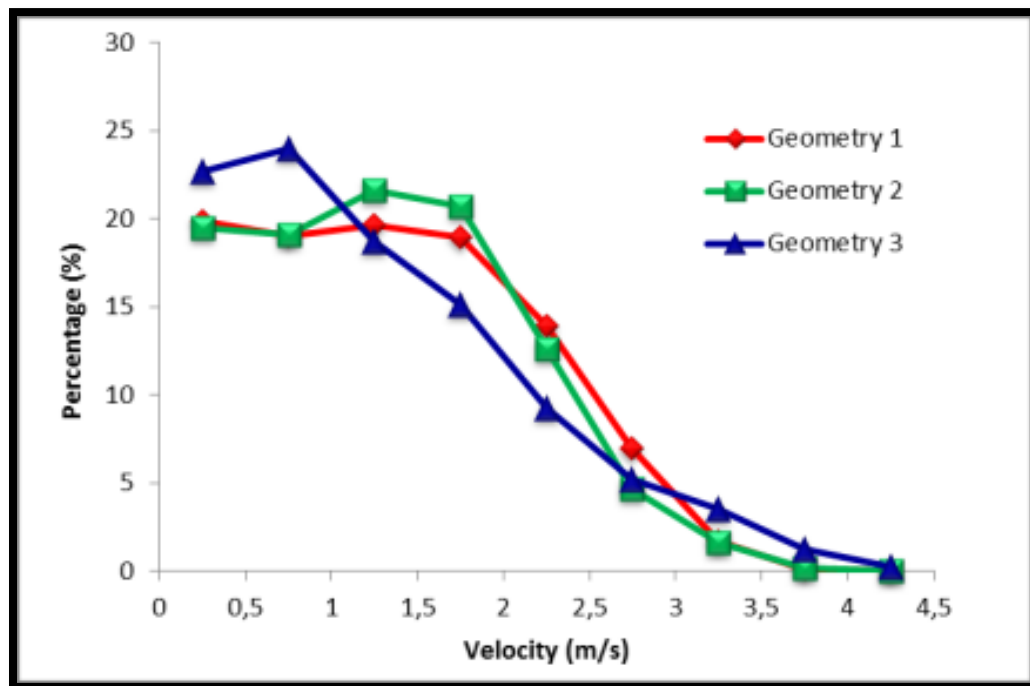


Figure 2.11 : Variation de la vitesse d'écoulement en fonction de la fraction volumique dans la cloison [10]

2.5 Importance de l'optimisation/amélioration du four de cuisson d'anodes

En considérant le procédé de production d'anodes en termes de consommation d'énergie, l'étape de cuisson est l'une des étapes avec le plus d'impact économique et environnemental. Par souci de diminuer cet impact, il existe une réelle volonté d'amélioration des paramètres d'opérations (en général) au sein du four et par extension cela génèrera une amélioration de la qualité des anodes cuites.

2.5.1 Analyse des briques réfractaires utilisées dans les fours de cuisson et diminution des couts de maintenance

Dans un même sens de vouloir diminuer la consommation d'énergie dans les fours, certains chercheurs se sont penchés sur la question d'usure et de déformation des briques et par conséquence du mur des cloisons dues aux sollicitations mécaniques, chimiques et l'effet du gradient de température qui existe tout le long du four [20]. L'étude a été menée afin de montrer, tout d'abord, qu'il est essentiel de sélectionner la composition de brique du mur de la cloison le plus souhaitable en termes de performance (voir le tableau 2.1).

Tableau 2.1 : Composition chimique des briques réfractaires [21]

(wt%)	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Alcalis	CaO
A	60.84	36.70	0.99	0.45	0.31
B	48.80	48.54	0.86	0.28	0.21
C	49.37	47.22	0.96	0.30	0.17
D	48.85	46.73	1.39	0.17	0.18
E	49.15	46.25	0.93	0.54	0.15
F	63.25	34.75	0.87	0.23	0.13
G	50.47	43.84	1.64	0.11	0.08

En effet, sept cas ont été étudiés avec différentes compositions en leurs composants des tests de déformation de fluage qui ont donc permis de montrer que plus le taux d'alumine est important moins il y aura de déformation et donc plus de résistance grâce à l'amélioration des propriétés thermomécaniques par le biais de l'amélioration des propriétés chimiques (voir la figure 2.12) [21]. Ainsi, plus le taux de SiO_2 et de Fe_2O_3 sont importants, plus il existe une amélioration des propriétés thermomécaniques.

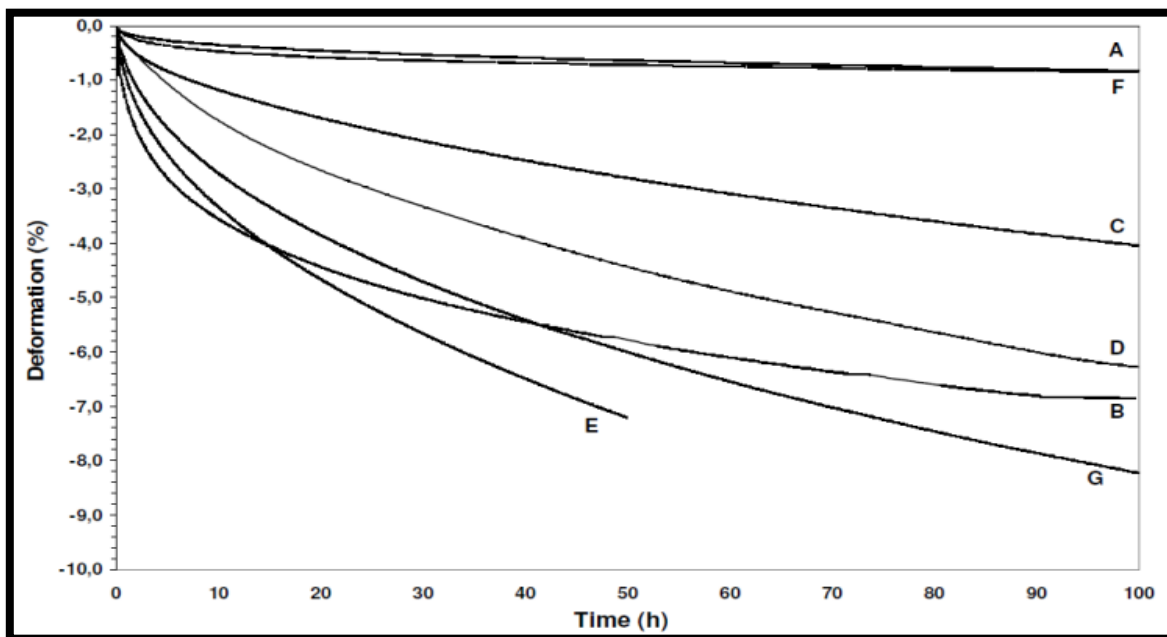


Figure 2.12 : Déformation des briques à différentes compositions en fonction du temps [21]

La sélection des briques réfractaires de la cloison permettra non seulement d'augmenter la durée de vie des murs de la cloison mais aussi les performances du four de cuisson et par conséquent ceci permettra de réduire substantiellement les coûts de maintenance [21].

2.5.2 Consommation de l'énergie spécifique dans les fours de cuisson d'anodes

La consommation de l'énergie spécifique est l'un des éléments les plus coûteux à prendre en considération lors de la mise en marche d'un nouveau four. Cette consommation est fonction de nombreuses variables qui dépasse l'influence du système de contrôle du procédé [22]. Certains travaux ont été menés sur la consommation d'énergie spécifique dans les fours de cuisson d'anode et les conditions limites à respecter notamment la teneur en oxygène, la pression négative, le temps d'incubation nécessaire pour le transfert thermique de la cloison au centre des anodes, le taux de chauffage, le coût de maintenance des réfractaires ainsi que la qualité des anodes. Par ailleurs, l'accent a été mis sur l'optimisation de la largeur des cloisons en tant que l'un des plus importants paramètres à prendre en considération dans le design d'un four.

En effet, en ayant une petite cavité de cloison il n'y aura pas assez de pression négative nécessaire pour maintenir un taux d'oxygène de 8% dans toutes les sections en tout temps. D'un autre côté, une grande cavité de cloison augmentera le flux d'air massique et donc les consommations d'énergie spécifique pour la combustion de ce surplus d'air [23]. D'après la figure 2.13, il est à noter que la cavité optimum possède la plus petite largeur ce qui permet de maintenir un taux d'oxygène continuellement dans toutes les sections du four. À savoir aussi que la largeur optimale doit être calculée en tenant compte des conditions limites et les dimensions du four et des anodes appropriées en incluant une possible modification future des dimensions des anodes.

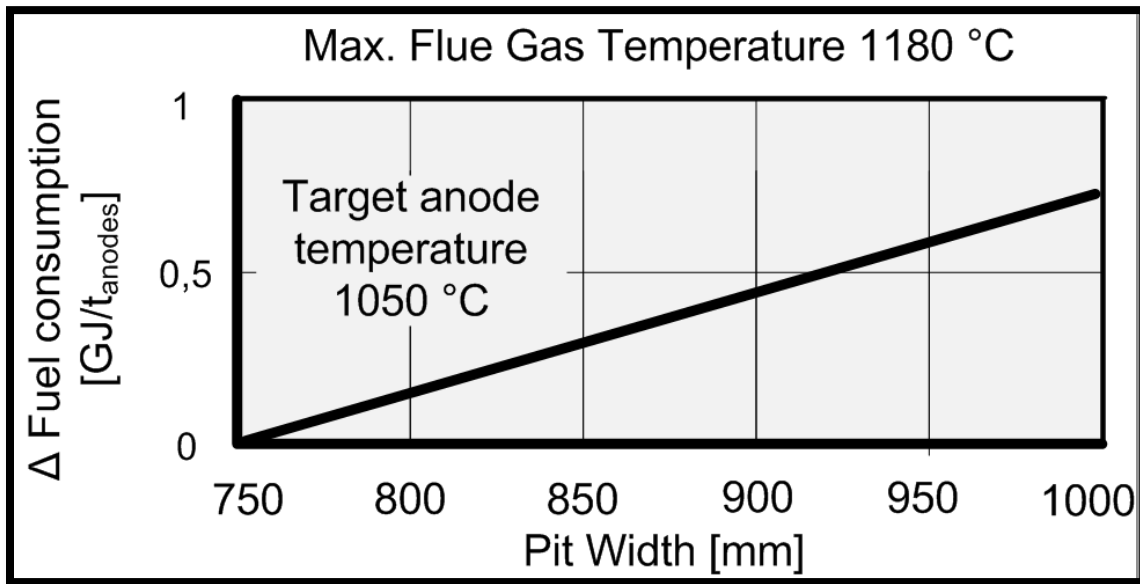


Figure 2.13 : Relation entre la largeur de la cloison et la consommation d'énergie en excès avec une température de la cloison de 1180°C [23]

2.5.3 Amélioration thermomécanique du mur de cloison

La difficulté d'opération sur le four et les fréquentes réparations sont responsables de diverses déformations que peut subir le mur dans un four de cuisson d'anodes conventionnel. La cause réside dans la finesse des parois qui manque de rigidité à la flexion et de capacité de transfert de cisaillement. Ceci pouvant donc interférer dans le bon transfert thermique entre les gaz chauds, la paroi et les anodes par conséquence [24]. En effet, d'après la figure 2.14, la combustion interne génère une source de chaleur indirecte nécessaire pour cuire les anodes à l'extérieur du mur. La réduction et l'élimination de problèmes thermomécaniques développés peuvent être effectuées en améliorant l'épaisseur du mur. Ceci prolongerait ainsi sa durée de vie et augmenterait la productivité de la cuisson des anodes [25].

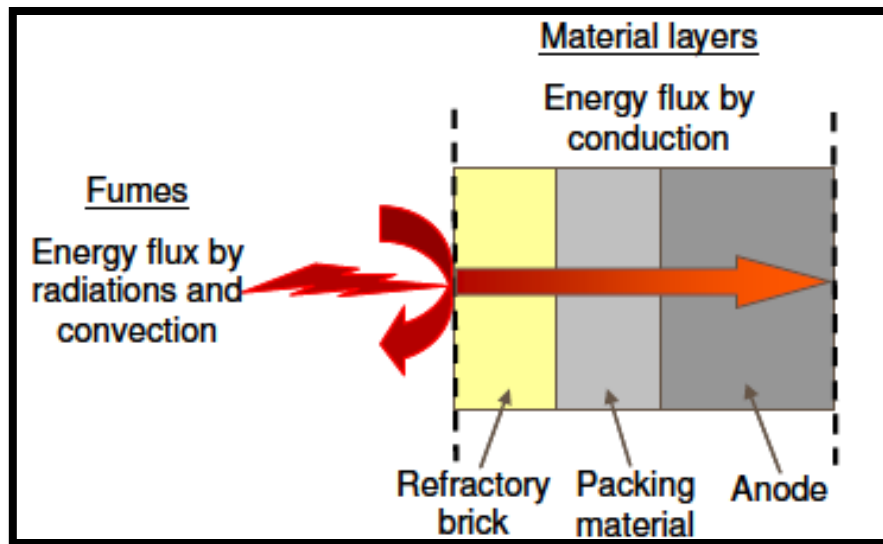


Figure 2.14: Schéma du transfert thermique des fumées jusqu'à l'anode pendant la cuisson des anodes [24]

Dans ce contexte, une étude a été effectuée par Chen et al. [26] afin de développer des méthodes d'analyse thermomécanique réalistes pour simuler le comportement du mur du four. Pour ce faire, une cloison témoin a été utilisée avec des dimensions de 5000 mm de longueur, 480 mm de largeur et 4500 mm de hauteur avec une composition du mur correspondant à 40% d'alumine (voir la figure 2.15).

Il a été démontré ainsi que le comportement du mur durant une période de latence ne change pas significativement et le rendement de chauffage et de refroidissement peuvent être augmentés sans affecter les prédictions pour l'amélioration du comportement du mur de la cloison dans le four [26].

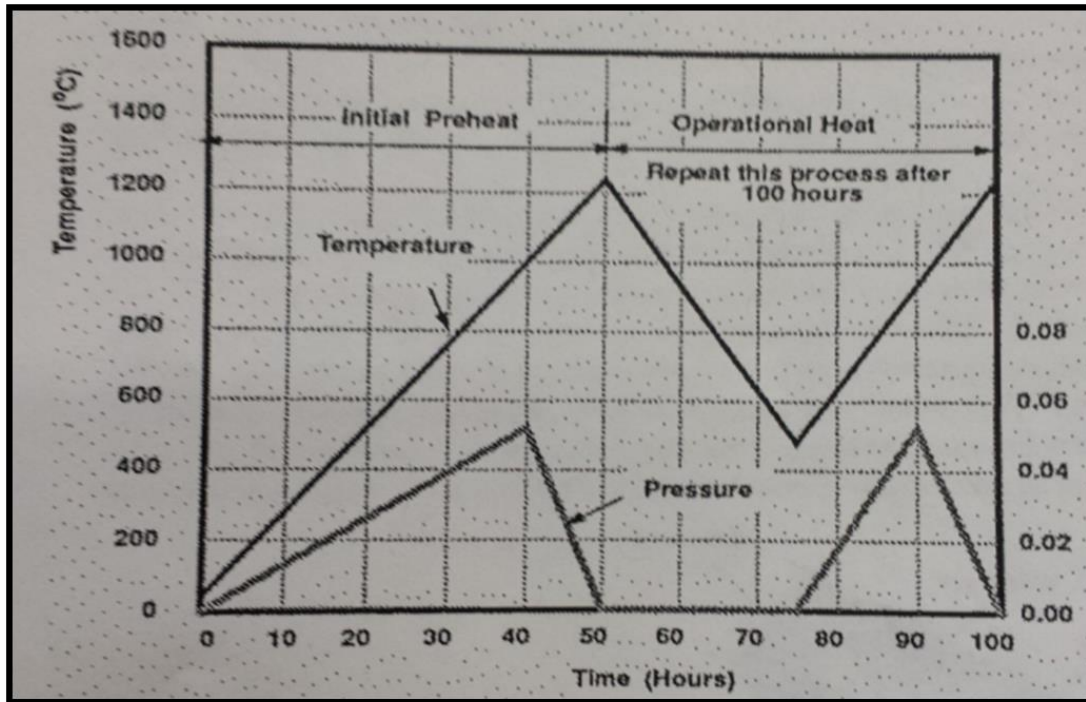


Figure 2.15 : Courbes de distribution de la température et de la pression [26]

2.6 Techniques de mesure de vitesse

La mesure de vitesse des gaz qui s'écoulent à l'intérieur de la cloison dans le cadre de ce projet pose un réel défi. Tant bien que les trajectoires prises par ces gaz sont faciles à identifier à l'aide d'une simple injection de fumée (à base d'eau) dans le flux à l'entrée, il est toutefois plus défiant d'accéder aux lignes de champ de vitesse. Il existe néanmoins des méthodes de mesure de vitesse locale (dans une région ou un point bien déterminé) qui sont susceptibles d'être utiles à l'échelle industrielle.

2.6.1 Tube de Pitot

Le tube de Pitot est un capteur de pression dont l'information nous permet de remonter à la vitesse grâce aux lois de Bernoulli [27]. Il est constitué de deux tubes cylindriques concentriques percés en des points bien particuliers [27]. Il est constitué de deux tubes coudés concentriques

dont les orifices, en communication avec le fluide dont on veut mesurer la vitesse, sont disposés de façon particulière : Le tube extérieur s'ouvre perpendiculairement à l'écoulement du fluide. La pression à l'intérieur de ce tube est donc égale à la pression ambiante ou pression statique.

Le tube intérieur est parallèle à l'écoulement du fluide et est ouvert en son bout, face au flux. La pression à l'intérieur de celui-ci est donc la pression totale, somme de la pression statique et de la pression dynamique [27]. Les tubes de Pitot doivent cependant être alignés avec le flux pour pouvoir effectuer une mesure convenablement, ce qui est parfois difficile car il est possible de ne pas connaître le sens d'écoulement. L'utilisation d'un tube de Pitot permet simultanément la mesure des pressions causées par le déplacement des molécules d'air frappant l'extrémité du tube de Pitot et la pression statique de la masse de fluide stationnaire. La différence entre ces grandeurs de pression représente l'amplitude corrigée de la pression provoquée par le mouvement de la masse de fluide seul [28] (voir figure 2.16).

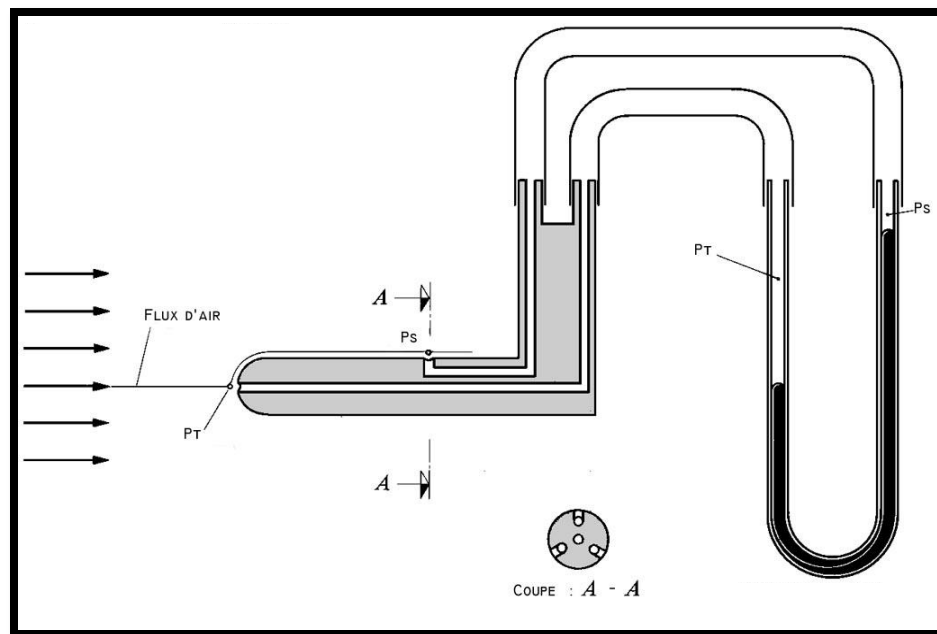


Figure 2.16 : Représentation d'un tube de Pitot de type L [29]

Aussi, les tubes de Pitot sont utiles pour les mesures des vitesses des liquides et des gaz (sauf que pour ces derniers il faut une correction de compressibilité pour le cas de nombre de Mach plus grand que 0,3). Par ailleurs, ils ne sont pas efficaces avec des petites vitesses car il y a une faible différence de pression. À noter que cette méthode de mesure est applicable pour des mesures dans le four de cuisson d'anodes (avec une certaine résistance aux hautes températures pour les mesures dans la section de chauffage) grâce notamment à la précision qu'elle permet d'avoir bien que dans le four à l'usine il n'existe aucune zone où le régime est complètement établi. Ce type de tube (tube de Pitot en L) peut facilement être placé à la sortie des gaz vu sa structure en L. Il existe cependant le type de Pitot de type S ou tube de Pitot inverse. Il est constitué de deux ouvertures opposées l'une à l'autre : l'une est en face du flux d'écoulement et l'autre à l'opposé de celui-ci. Durant la prise de mesure, la différence de pression issue des deux ouvertures indique la vitesse d'écoulement des gaz [29]. Ce type de tube de Pitot représente une alternative non envisageable dans le cas des travaux à l'usine car son introduction dans les conduites représente une autre difficulté. Sa géométrie (extrémité en S) en est la cause car cela ne permet pas un positionnement idéal à la sortie des gaz en plus de la présence d'une faible différence de pression au niveau de la cloison maquette.

2.6.2 Anémomètre à fils chaud

Constitué d'un fil fin traversé par un courant électrique. Une certaine résistance électrique existe alors et est sensible au passage de l'air. Plus l'air souffle fort et plus il y aura refroidissement du fil. Dans ce cas la résistance électrique diminue. Sachant que l'élément résistif est placé dans un pont de Wheatstone, la variation de la résistance déséquilibre celui-ci. Un voltmètre est placé au milieu de ce pont permet de mesurer sa tension de déséquilibre et ensuite si l'anémomètre est

calibré permet de mesurer la vitesse. Il permet de mesurer des vitesses de l'ordre de 0.1 m/s jusqu'à des centaines de m/s (pour un écoulement d'air). En plus, il présente une excellente résolution spatiale et temporelle qui en fait une technique de mesure de choix pour l'étude des fluctuations turbulentes [27]. Cet instrument (voir figure 2.17) est idéal pour mesurer les fluctuations rapides comme dans une couche limite turbulente et pouvant mesurer à une large gamme de nombre de Reynolds (doit être calibré pour chaque situation malgré cela). Il est à noter qu'il est fragile et n'est pas souhaitable pour les liquides à cause de leur haute densité et de la présence éventuelle de sédiments qui peuvent heurter l'instrument [27]. À noter que cette méthode de mesure est applicable pour nos travaux à l'échelle du laboratoire mais ne l'est pas au four industriel car les températures ne doit pas dépasser les 80°C (même dans les sections froides du four industriel les températures peuvent dépasser les 80°C). En effet, la mesure de vitesse d'écoulement avec un tel instrument de mesure nécessite une manipulation qui doit être très proche de la zone de mesure. Avec des températures assez élevées il peut y avoir un risque pour l'appareil et pour l'utilisateur. Une autre alternative de mesure à l'échelle industrielle est donc envisageable.

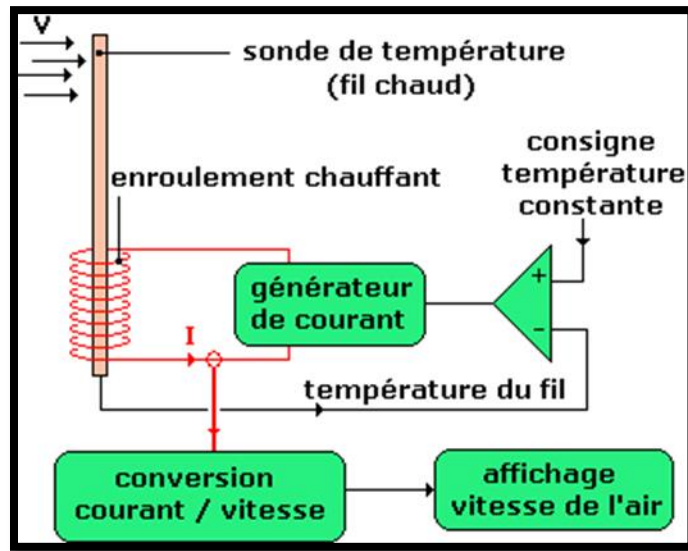


Figure 2.17 : Principe de fonctionnement d'un anémomètre à fil chaud

2.6.3 Vitesse déduite des particules visibles entraînées par le flux

Cette méthode permet de simuler le mouvement du flux (particules sphériques pour un liquide et de la poudre pour un écoulement gazeux) mais elle est aussi simple et effective. Le temps nécessaire pour une particule de traverser une distance bien déterminée indiquera la vitesse d'écoulement du fluide [29]. À noter que cette méthode n'est pas applicable dans notre cas notamment à cause de la complexité de l'écoulement dans la maquette à l'échelle du laboratoire et l'impossibilité de leurs utilisations à l'usine car les cloisons sont inaccessibles.

2.6.4 Équipements mécaniques rotatifs (anémomètre rotatif à coupelles, rotor de Savonius, héliomètre ou encore turbidimètre)

Utilisés pour les liquides et les gaz, ces équipements (exemples figures 2.18 et 2.19) sont très utilisés dans l'atmosphérique et l'océanographique. Ces instruments sont capables de s'aligner eux-mêmes avec le flux (à part l'héliomètre et le turbidimètre).

Cependant, ils sont généralement de grande taille et ne représentent donc pas un « point » [29]. À noter que cette méthode n'est pas applicable dans notre cas et pour nos mesures car ces équipements ne conviennent pas pour les dimensions des cloisons et donc ne peuvent pas être introduites.

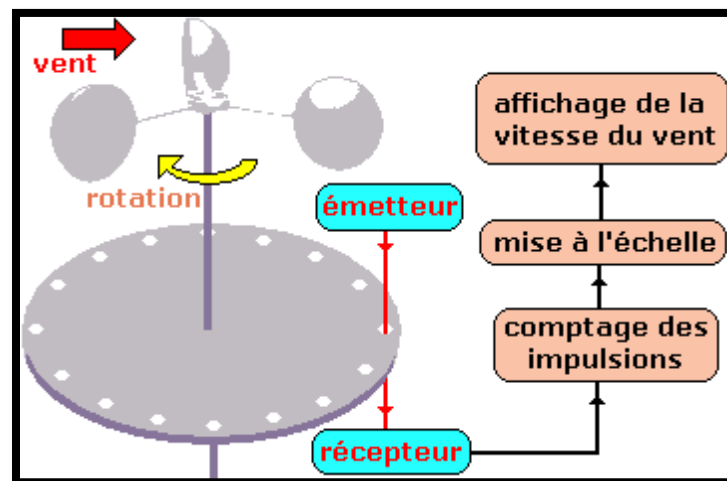


Figure 2.18 : Principe de fonctionnement d'un anémomètre rotatif à coupelles

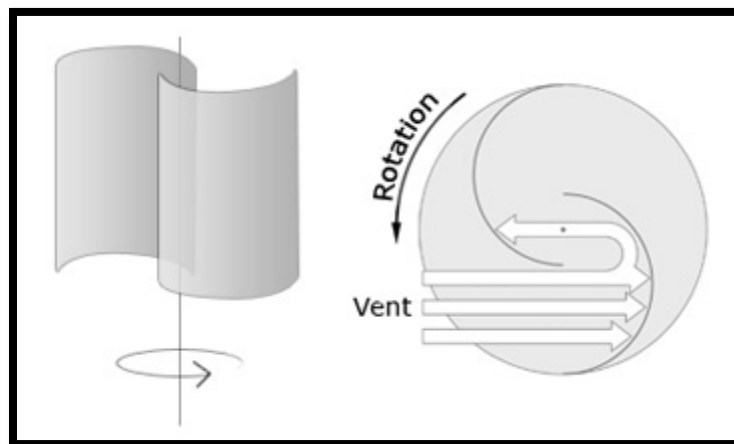


Figure 2.19 : Représentation d'un rotor de Savonius

2.6.5 Électromètre magnétique

Un champ magnétique est appliqué à travers un fluide conducteur. Le mouvement de celui-ci (le fluide) va induire une tension aux bornes de 2 électrodes. Il n'y a pas une résistance notable par les électrodes mais ce type d'instrument est plus utilisé pour les métaux liquides car ils donnent une très forte réponse puisqu'ils sont très conducteurs [29]. À noter que cette méthode n'est pas applicable dans notre cas car on mesure des vitesses d'écoulement de gaz.

2.7 Conclusions

La recherche bibliographique a permis de conclure que pour les travaux sur la mesure de l'écoulement dans les cloisons des fours de cuisson d'anodes, il y a principalement des simulations par modélisation mathématique mais pas de mesures expérimentales qui ont été effectuées. En effet, la complexité de l'écoulement rend le choix des équipements qui peuvent être utilisés pour effectuer différents types de mesures très restreint. Par conséquent, il n'existe pas des travaux de mesure dans les cloisons du four de cuisson d'anodes.

Chapitre 3

Méthodologie

3.1 Introduction

Le four de cuisson d'anodes est composé d'alvéoles (là où les anodes non cuites sont superposées) et de cloisons (où s'écoulent les gaz chauds et qui sont parallèles de part et d'autres de chaque alvéole). Afin de pouvoir effectuer une modélisation physique de la cloison du four de cuisson d'anodes où s'écoulent les gaz chauds nécessaire pour la cuisson, le choix a été porté sur la mise au point d'une maquette de la cloison. Essentiellement, les travaux sont divisés en deux parties, à savoir une partie à l'échelle du laboratoire et une autre à grandeur réelle et donc une application adaptée directement à l'industrie. Plusieurs tests ont été donc effectués durant ce projet de maitrise. Le but étant d'effectuer une étude sur l'écoulement dans le four horizontal de cuisson d'anodes, l'approche était la suivante :

- *Travaux à l'échelle du laboratoire qui consiste à observer, définir et mesurer les différentes vitesses d'écoulement à différents endroits. Cela permet en effet de distinguer les zones où il y a variation de l'écoulement (variation de vitesse, de trajectoire, etc.). Les mesures et les hypothèses issues de ces travaux ont été comparées avec les données recueillies à l'échelle de l'industrie.*

- *Travaux à l'échelle de l'usine : des mesures ont été effectuées dans les cloisons où les conditions le permettent en tenant compte des configurations de chaque cloison (sections de préchauffage et refroidissement).*

La comparaison entre les mesures et la caractérisation effectuée à l'échelle du laboratoire et de l'usine permet de définir les facteurs de correspondance. En effet, les paramètres opératoires en usine sont différents de ceux au niveau du laboratoire. Les températures, étant élevées dans la cloison de l'usine, influencent les mesures de vitesses qui sont dépendantes de ce paramètre en particulier. En considérant qu'il existe les mêmes tendances entre la cloison usine et la cloison maquette, des facteurs de correspondance peuvent être calculés tenant compte des différences des milieux où s'écoule l'air circulant dans la cloison (usine ou maquette). Moyennant ces facteurs, il sera possible d'estimer les débits dans les différentes sections du four de cuisson d'anodes avec la maquette cloisons (simulation physique). En termes de milieu d'écoulement des gaz, à l'échelle du laboratoire et celui de l'usine à part des différences dans les matériaux de construction (utilisation du plexiglass dans la maquette cloison donc absence de rugosité), les conditions sont différentes au niveau des paramètres opérationnels :

- *durant les mesures de vitesse dans la maquette, la température est la température ambiante de la pièce d'où la faciliter d'effectuer des mesures,*
- *au niveau de l'usine, dans certaines sections les températures peuvent atteindre les 1300°C.*

Cette différence influence donc la comparaison entre les données du laboratoire et celles de l'usine. Cela dit, les travaux effectués dans ce projet de maîtrise montrent que même si les valeurs mesurées dans les deux cas ne sont pas du même ordre de grandeur, les tendances restent

très similaires. Le calcul et la détermination d'un facteur de correspondance pour les cas (configuration de la cloison) étudiés est en effet pertinent. Dans ce qui suit, la méthodologie suivie dans les deux échelles est détaillée.

3.2 Méthodologie à l'échelle du laboratoire

Comme méthodologie à l'échelle du laboratoire, il y a eu d'abord une modélisation physique de la cloison du four de cuisson et la visualisation de l'écoulement pour différentes géométries (réarrangement des entretoises et/ou des chicanes). Une maquette de la cloison à l'échelle 1:4 a été fabriquée (une dimension relativement importante mais peu encombrante qui permettra d'effectuer des tests de mesures).

3.2.1 Développement du système maquette cloison

La maquette est à l'échelle 1:4 présentant une réplique d'une cloison industrielle typique est indiquée par la figure 3.1. Avec un côté transparent, il a été possible de visualiser l'écoulement à l'intérieur et même de reconnaître les zones de faibles vitesses et de recirculation. Deux configurations ont été simulées avec la maquette. les deux configurations sont alors appelées :

- *maquette de configuration 1 fidèle à la cloison à l'usine et confidentielle,*
- *maquette de configuration 2 ayant deux rangées de briques issue de la littérature (voir figure 3.1) [25].*

L'entrée a été modifiée afin de permettre une diffusion assez homogène de l'air. En effet, la souffleuse possède une sortie ronde, petite et envoie un jet d'air concentré. Une grille rectangulaire (aux mêmes dimensions que l'entrée de la cloison maquette) a été fabriquée afin de

permettra de répondre et répartir tout l'air soufflé à l'entrée d'une manière homogène. En injectant avec le débit d'air une quantité de fumée blanche, l'écoulement devient visible. Il est possible de varier la géométrie de la maquette (la répartition des briques et des entretoises) afin de permettre de comparer et/ou valider des modèles de prédiction mathématique. Comme indiqué sur les figures 3.2a, 3.2b et 3.2c, il existe deux choix d'emplacements pour les prises de mesure qui permettent de simuler d'écoulement et de calculer les débits entrants et sortants:

- l'emplacement de prise de mesure indiqué dans la figure 3.2a permet d'avoir une caractérisation générale du champ de vitesse et peut indiquer s'il existe une concordance avec la simulation mathématique expliquée plus tard, par ailleurs, ce balayage permettra de définir les zones où il existe des variations de l'intensité de vitesses. l'air s'introduisant dans la cloison maquette va contourner les briques et les entretoises de la cloison. par conséquent, il y aura des zones où existe une meilleure distribution des vitesses que d'autres,
- l'emplacement de prise de mesure indiqué dans la figure 3.2b peut donner une meilleure idée sur les débits à l'entrée et à la sortie afin d'évaluer les infiltrations suivant l'ouverture partielle ou totale de certains ou de tous les ouvreaux. Ainsi ce choix de points peut être applicable non seulement à l'échelle de la maquette mais aussi celui de l'usine car les points seront ainsi accessibles. En effet, bien que l'accessibilité à tous les points de la cloison soit permise au niveau de la maquette, cela représente un réel défi au niveau de l'usine compte tenu des paramètres opératoires (températures élevées).

Dans un même sens et comme indiqué sur la figure 3.2c, la mesure de vitesse en des points bien précis consiste en un balayage complet de la zone où s'écoule l'air à travers les briques (au niveau des entrées/sorties, pouvant être A ou B selon la figure 3.1). D'un autre côté, l'écoulement étant complexe au niveau des ouvreaux, un dispositif sous forme cylindrique

(comme indiquée sur la figure 3.2) a été mis en place pour un balayage complet (mesure de la vitesse à différents endroits) afin de palier la variation brusque de la vitesse dû au non établissement du régime d'écoulement. Pareillement, les ouvreaux au niveau de l'usine représentent aussi la même forme, à savoir une entrée cylindrique pour permettre d'introduire les brûleurs ou comme dans le cas de ce projet les instruments de mesures nécessaires pour l'étude de l'écoulement. Dans cette étude, on a considéré que cette forme cylindrique permet au régime de s'établir le plus possible et donc d'homogénéiser la vitesse suivant qu'il s'agit d'une entrée (cas où il y a aspiration du quatrième ouvrage) ou d'une sortie (s'il y a un soufflage du premier ouvrage). À noter que ce choix de points est valable pour les travaux effectués sur la maquette de configuration 1 et 2.

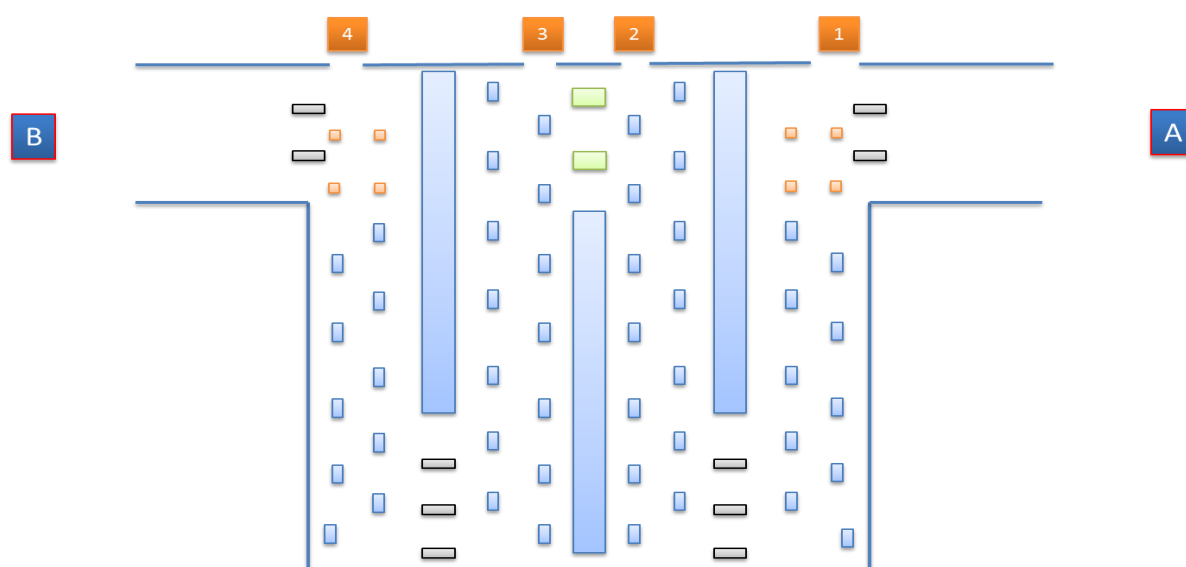


Figure 3.1 : Schéma représentatif de la maquette cloison de configuration 2(A ou B étant l'entrée ou la sortie, 1, 2, 3 ou 4 étant les ouvreaux siège d'infiltration ou d'exfiltration

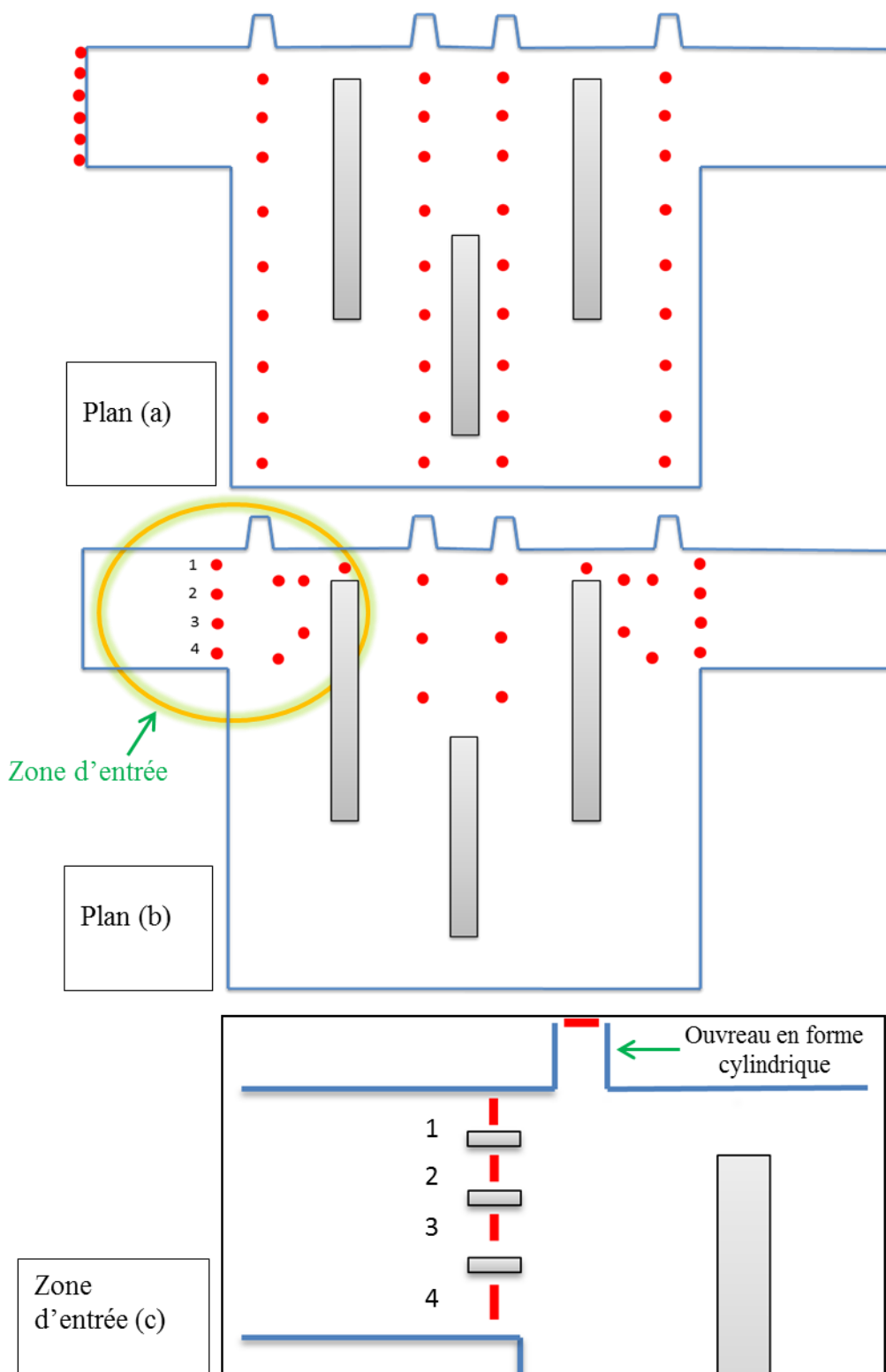


Figure 3.2 : Plan avec points de prises de mesures de vitesse : (a) du champ de vitesse en général, (b) des entrées et sorties et (c) agrandissement de la zone d'entrée indiquée dans (b)

Dans le même sens et afin d'évaluer le changement de la géométrie de la cloison, une autre maquette a été mise au point. Celle-ci représente les mêmes dimensions (échelle 1:4) que la réplique industrielle. Néanmoins, cette deuxième maquette se compose de deux rangées de briques au lieu d'une seule (voir figure 3.1) permettant ainsi de modéliser un écoulement avec un tel arrangement de briques. D'après cette même figure 3.1 de la maquette de configuration 2, il est possible de distinguer les briques et les entretoises nécessaires pour avoir une bonne répartition de l'air à travers la maquette cloison. Il existe deux rangées et cette maquette est fidèle au modèle proposé par Chen et al [25]. Les parties A et B comme indiqué sur la figure 3.1 correspondent aux deux ouvertures qui peuvent correspondre, suivant le cas à étudié et en sachant que l'écoulement s'effectue toujours de A vers B, à :

- *en cas de simulation de l'aspiration (réelle ou sortie) : b est la sortie par aspiration et a l'entrée d'air,*
- *en cas de simulation du soufflage : A est l'entrée par soufflage et B est la sortie d'air,*

Les chiffres de 1 à 4 indiquent les ouvreaux à partir desquels il est possible d'effectuer un soufflage ou une aspiration selon le cas (à noter que l'écoulement s'effectue toujours du côté de l'ouveau 1 vers le côté de l'ouveau 4) :

- *une aspiration par l'ouveau 4 permet de simuler l'aspiration dans la section de préchauffage (cloison 1 dans la figure 2.3), les ouvreaux 1, 2 et 3 sont donc le siège d'infiltration dans ce cas,*
- *un soufflage par l'ouveau 1 permet de simuler le soufflage dans la section de refroidissement (cloison 9 et 12 de la figure 2.3; dans le cas de cloison 12, il y aura exfiltration par les ouvreaux 2, 3 et 4).*

La caractérisation expérimentale du champ de vitesse dans la maquette ainsi que les tests des méthodes de mesures dans le contexte de l'écoulement dans une cloison viendra par la suite. Les tests sur la maquette consistent en la mesure de vitesse (à température ambiante) grâce à un anémomètre à fil chaud (Logicheck, AVM430) pour la mesure des vitesses (voir figure 3.3) suivant le positionnement des points de mesure (figure 3.2a et 3.2b) dans la maquette et une soufflerie (aspirateur de matériaux secs, KING CANADA, 856DLST) pour permettre de simuler un soufflage ou aspiration suivant la section à étudier (section de refroidissement ou de préchauffage comme indiqué dans la figure 2.1 et expliquer dans la première partie du chapitre 2 sur la recherche bibliographique). Trois mesures de vitesse sont effectuées à chaque point et pour chaque série de mesure. Comme indiquée sur la figure 3.3, l'extrémité de l'anémomètre (de là où il est possible de mesurer la vitesse) peut être orientée. L'orientation s'effectue jusqu'à l'obtention d'une vitesse la plus élevée et la plus stable possible. Plus tard dans le chapitre 4, cette direction d'orientation est indiquée par des flèches sur certaines figures.



Figure 3.3 : Anémomètre à fil chaud utilisé pour les mesures au laboratoire

Le nombre de mesures au début était de cinq prises afin d'avoir une meilleure exactitude des vitesses obtenues, cela dit, il s'est avéré qu'il est tout à fait possible d'obtenir une même exactitude avec seulement trois prises de mesures de vitesse par point gagnant ainsi un temps considérable pour les tests effectués tout au long du projet. Un test d'étanchéité et de visualisation de l'écoulement est effectué entre chaque série de mesure. Plusieurs séries de mesure de vitesse sont mises au point. Elles sont distinctes et en fonction de la simulation de l'écoulement désirés. L'accent a été spécialement mis sur la simulation des sections de refroidissement et de préchauffage compte tenu des températures du milieu considérées comme relativement basses par rapport aux sections de chauffage où se trouvent les bruleurs et par conséquence moins de pertes dus à l'infiltration.

3.2.2 Visualisation de l'écoulement

Pour ce faire, des tests d'écoulement d'air sont effectués au niveau de la maquette cloison afin de pouvoir visualiser celui-ci. Parallèlement à l'écoulement de l'air, de la fumée blanche (type industrielle) est injectée dans le flux d'air entrant permettant de distinguer les contours de vitesse et les lignes d'écoulement de l'air à l'intérieur de la maquette cloison avec la géométrie (emplacement des briques et des entretoises) de l'usine ainsi que la géométrie de configuration 2 issue de la littérature. La machine à fumée utilisée pour ce test de visualisation est de type : Antari, F-80z, type alpha.

3.2.3 Simulation de l'écoulement

Pour chaque section, la simulation de l'écoulement est étudiée et est physiquement modélisée par une variation des entrées et des sorties par A ou B (figure 3.1) mais aussi les ouvreaux à partir desquels il y a exfiltration, infiltration, soufflage ou aspiration.

3.2.3.1 Section refroidissement

Comme indiqué sur la figure 3.4, il est important de préciser qu'il y a eu une simulation du soufflage naturel suivant le même sens (de droite à gauche) que dans le four (figure 2.1). En effet, il s'agit dans ce cas de souffler de l'air de l'extérieur jusqu'à l'intérieur de la maquette cloison à partir de l'ouveau 1. Cependant, bien que le soufflage ne s'effectue que par cet ouveau, cela n'est pas considérée comme le seul point d'entrée d'air. La proximité de l'ouveau 1 avec l'entrée A peut engendrer une rentrée d'air supplémentaire. L'entraînement du soufflage permet de ramener considérablement plus d'air à partir de ce point. Cet effet de soufflage va être discuté dans les analyses des résultats. Par ailleurs, il existe la même configuration au niveau de l'usine. La figure 3.4 indique la présence d'une cloison supplémentaire avant la section de refroidissement 6 (en tenant compte du sens d'écoulement d'air de droite à gauche au niveau du four, figure 2.1). Cette cloison bien qu'elle n'existe que pour des raisons d'entretiens, de l'air peut être ramené de celle-ci par la force d'entraînement du soufflage.

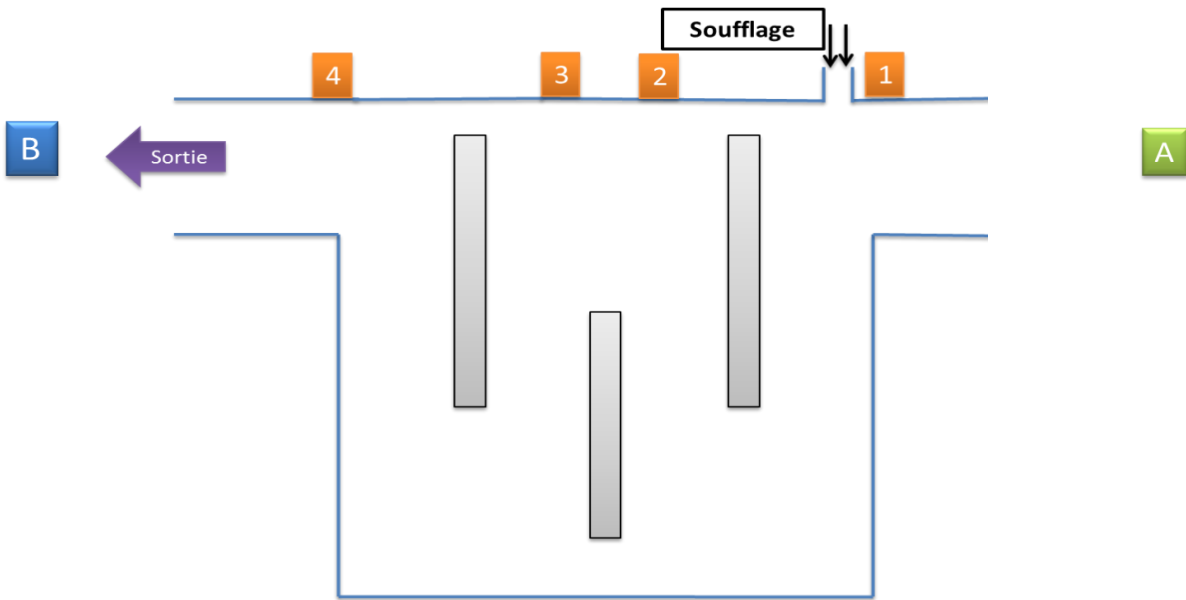


Figure 3.4 : Plan général de la maquette (simulation de la section refroidissement)

Dans ce sens, l'air qui sera donc ramené par le soufflage à partir de l'ouverture 1 et l'entrée A va parcourir la cloison maquette jusqu'à la sortie B et les ouvertures 2, 3 et 4. Parallèlement, il est pertinent d'indiquer que seule B peut être considéré comme sortie. La sortie de l'air s'écoulant dans la maquette cloison n'est autre que l'exfiltration (avec la sortie d'air à partir de la sortie B) qui va être estimé à partir des ouvertures 2, 3 et 4. Ces ouvertures sont totalement ouvertes afin que cela soit le plus représentatif possible de la cloison usine. Le taux d'exfiltration est donc calculé à partir de chacun des ouvertures d'une part, et en tant que taux d'exfiltration global d'autre part (somme des taux d'exfiltration à partir de chaque ouverture). La simulation de la section de refroidissement (sections 9 et 10 de la figure 3.5) permettra donc d'estimer l'entrée, la sortie et le taux d'exfiltration total dans cette section du four de cuisson d'anodes.

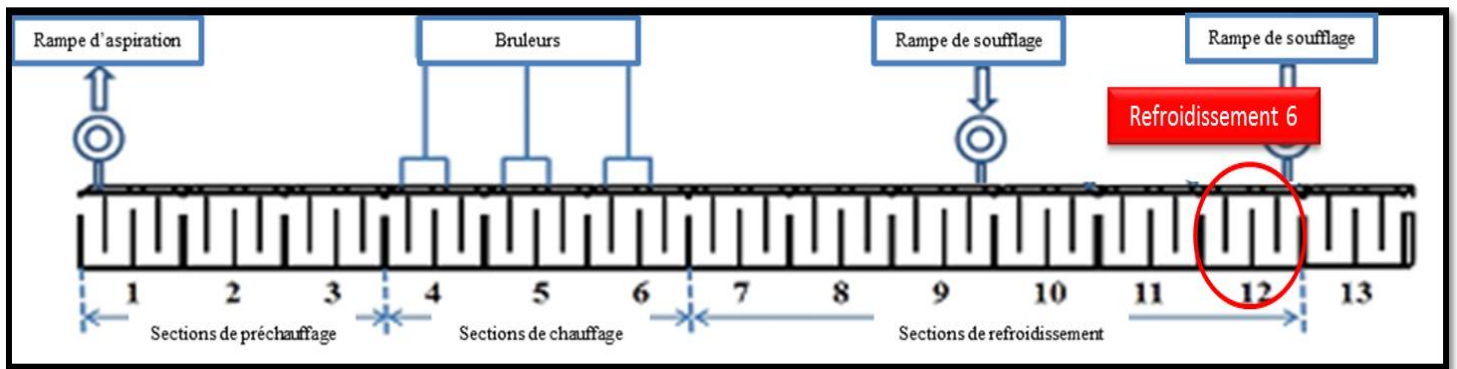


Figure 3.5 : Représentation générale du four de cuisson d'anodes indiquant la section de Refroidissement 6 [9]

Par ailleurs, la section siège du soufflage forcé (section 12, les ouvréaux 2, 3 et 4 ouverts) ainsi que la section qui la suit (sections 10 et 11 de la figure 3.5) possède des ouvréaux (de 1 à 4) complètement ouverts afin de permettre de refroidir les anodes cuites le plus possibles et par conséquence envoyer la chaleur à l'extérieur de la cloison. Dans un autre sens, chaque cloison qui suit celle où il y a un soufflage naturel (section 9 de la figure 3.5) possède toujours des ouvréaux complètement fermés afin de permettre la continuité de l'écoulement tout au long du four de cuisson des anodes.

3.2.3.2 Section de chauffage

La figure 3.6 illustre la manière avec laquelle les tests ont été effectués. Le soufflage dans ce cas est effectué à partir de l'entrée A afin de simuler l'entrée d'air à partir d'une précédente cloison. En ce qui concerne la sortie d'air par B, cela est considéré comme la continuation de l'écoulement de l'air vers la section suivante.

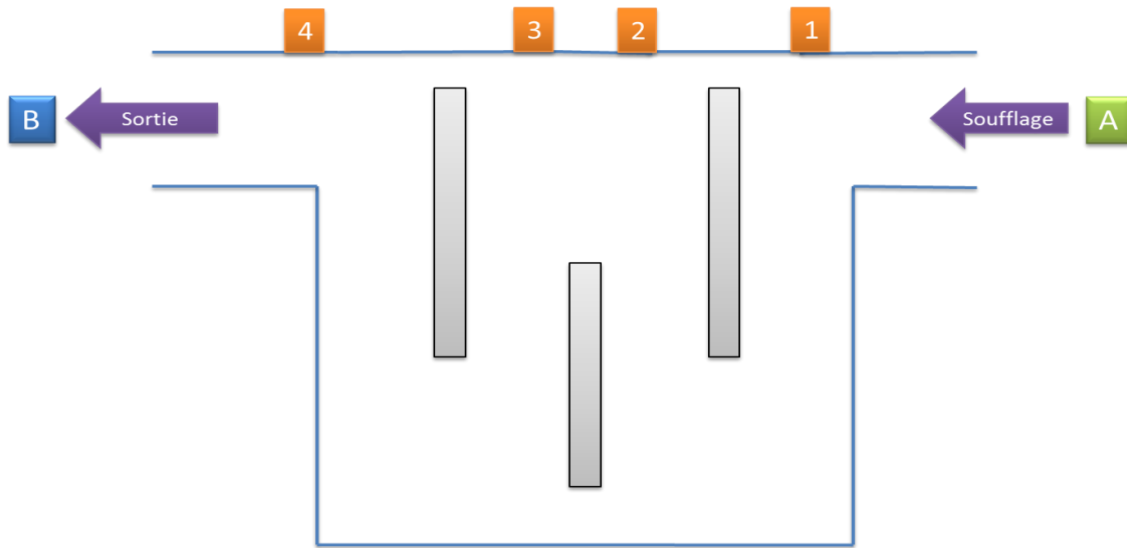


Figure 3.6 : Plan général de la maquette (simulation de la section chauffage)

Il est important d'indiquer que concernant cette section du four, la simulation physique (avec la maquette cloison) a été effectuée mais ne peut pas être représentatif à 100% de celle au niveau de l'usine. Dans la section de chauffage du four, il existe des brûleurs au niveau des ouvreaux (figure 3.7) qui permettent l'injection du carburant nécessaire afin de chauffer l'air pour la cuisson des anodes (sections 4, 5 et 6). Le flux injecter par ces brûleurs influence l'écoulement de l'air dans la cloison à l'usine. Par ailleurs, il n'existe pas de tels dispositifs dans la maquette cloison. Cependant, la simulation a quand même été effectuée permettant d'étudier l'écoulement de l'air dans de telles conditions. Comme il n'existe pas de soufflage dans la partie de chauffage, il n'est pas nécessaire de prendre l'un des ouvreaux comme entrée. La détermination des débits entrants et sortants permettra ainsi d'établir un bilan de masse.

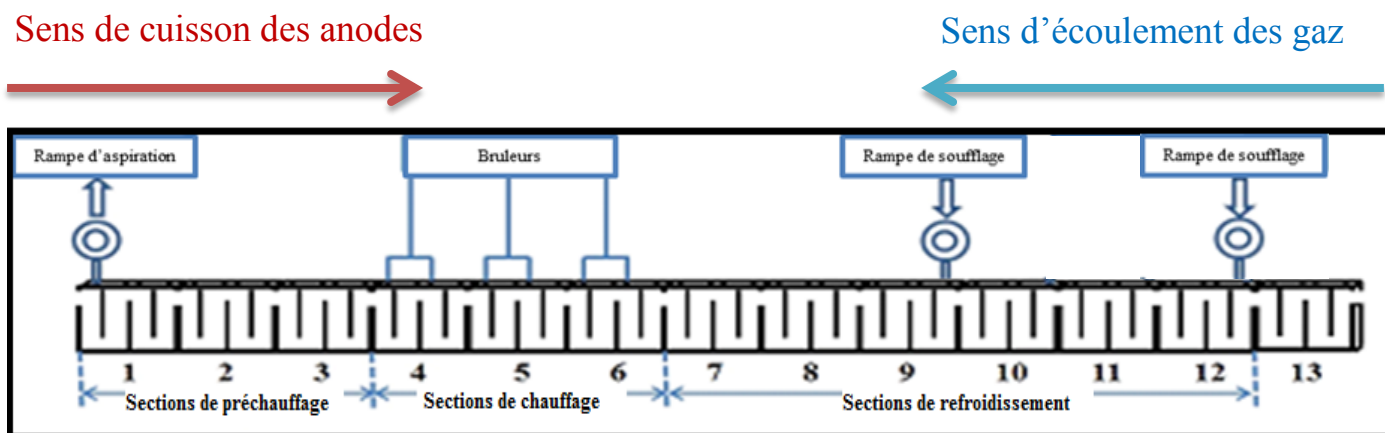


Figure 3.7 : Schéma caractéristique d'un four de cuisson d'anodes avec les différentes sections indiquant les sections de chauffage 4, 5 et 6 [9]

3.2.3.3 Section de préchauffage

La configuration de la maquette cloison a été modifiée comme indiqué sur la figure 3.8 afin de permettre de simuler physiquement l'écoulement dans la section de préchauffage 1 (figure 3.9). L'aspiration des gaz vers l'extérieur de la maquette est effectuée par l'ouverture 4 afin de rester le plus fidèle possible à la cloison du four à l'usine. La sortie B est donc bloquée car il s'agit du début du cycle de cuisson et la fin du cycle d'écoulement de l'air (figure 3.7). Cependant, grâce à l'aspiration par l'ouverture 4, l'air sera donc ramené à partir de l'entrée A ainsi que par les ouvertures 1, 2 et 3 sous forme d'infiltration rendant ainsi cette configuration très proche de celle à l'usine et d'où la pertinence de la modélisation physique avec la maquette cloison. Le calcul des vitesses au niveau de l'entrée des ouvertures 1, 2 et 3 permettra de déterminer les taux d'infiltration à partir de chaque ouverture et par conséquent le taux d'infiltration global considéré comme un apport supplémentaire d'oxygène nécessaire à la combustion.

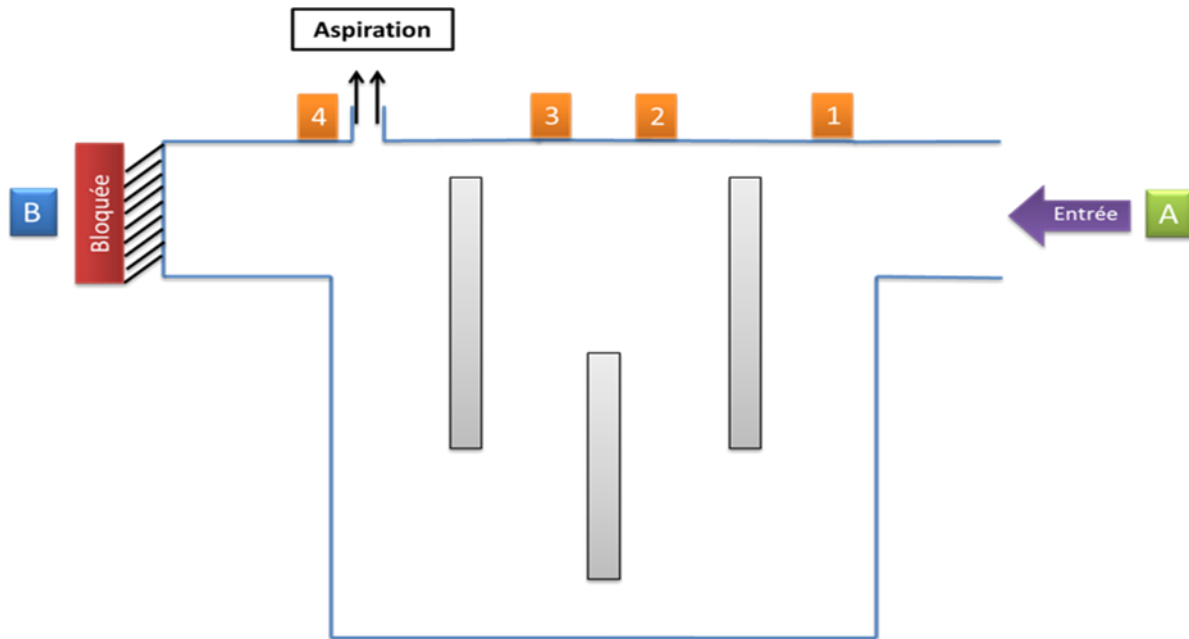


Figure 3.8 : Plan général de la maquette (simulation de la section de préchauffage)

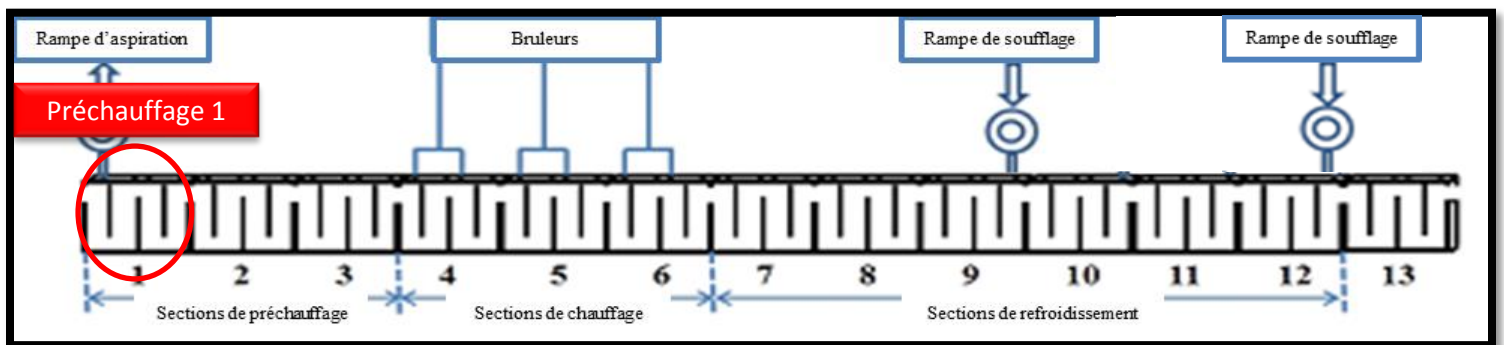


Figure 3.9 : Représentation générale du four de cuisson d'anodes indiquant la section de préchauffage 1 [9]

Par ailleurs, il existe une différence entre les sections 2 et 3 d'une part et la section 1 d'autre part. Cette différence réside en effet dans le fait qu'à section 1 il y a plus d'infiltration car la dépression y est plus importante. Cependant, il est à noter que les résultats discutés dans ce mémoire se portent majoritairement sur les travaux effectués sur la maquette cloison 2 issues de la littérature. Cette partie de la méthodologie est divisée en deux parties :

- une visualisation de l'écoulement dans chacune des cloisons maquette (de configuration 1 et de configuration 2),
- un calcul des débits à l'entrée et à la sortie ainsi qu'aux ouvreaux (le cas échéant) afin de déterminer les bilans de masse pour chaque section du four à simuler (section de préchauffage et de refroidissement).

3.2.3.4 Calcul des débits et bilans de masse

Afin de déterminer les taux d'infiltration (s'il s'agit de la section de préchauffage) ou les taux d'exfiltration (dans le cas de la section de refroidissement), il est important d'établir les bilans de masse pour chaque cas et configurations simulées comme développées dans les parties précédentes. Le bilan de masse représente le rapport entre la quantité d'air totale sortante et la quantité d'air totale entrante (incluant par les ouvreaux dans les deux cas). Pour ce faire, les vitesses sont mesurées à chaque entrée et sortie (figure 3.2c). Connaissant les dimensions des entrées au niveau de la maquette cloison, il est donc possible de déterminer le débit entrant ou sortant dans chaque cas. Par ailleurs, l'air circulant par ou à travers les ouvreaux est considéré comme infiltration ou exfiltration, il été donc pertinent de varier les ouvertures au niveau de ces derniers. Cette variation est de 5%, 10%, 15%, 20% d'ouverture et représente une palette de variation jugée représentative de celle au niveau de l'usine, donc une estimation. En effet, en plus de représenter l'infiltration ou l'exfiltration, cette variation permet de connaître l'effet de la variation de l'ouverture sur le taux d'infiltration ou d'exfiltration. L'ouverture au niveau est faite de telle sorte que seul le contour de l'ouverture (en bloquant dont le milieu) est varié de 5 à 20% comme indiqué sur la figure 3.10. Les bilans de masse ainsi calculés peuvent être très utiles car

ils indiquent le degré de précision des mesures de vitesses effectués tout en prenant compte la complexité de l'écoulement et la précision de mesure des appareils utilisés.

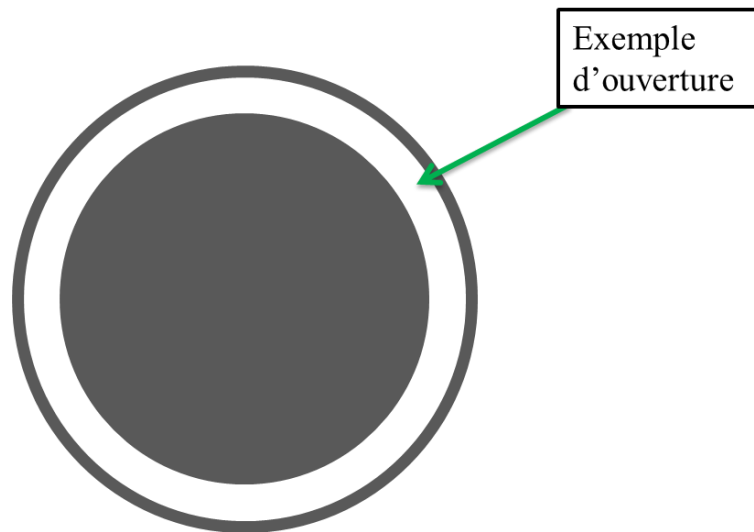


Figure 3.10 : Représentation du dispositif pour la variation de l'ouverture au niveau des ouvreaux de la cloison maquette

Par ailleurs, au niveau de l'usine, les infiltrations et les exfiltrations sont présentes partout au niveau de la cloison et ne sont certainement pas précises d'où l'importance de la variation de l'ouverture. Dans cette étude, les infiltrations sont représentées par les ouvertures au niveau des ouvreaux sur la maquette cloison. En effet, qu'il s'agit d'infiltration ou d'exfiltration, cela s'effectue par les ouvreaux car c'est l'endroit où il est possible d'introduire des instruments de mesure de tout type. Le couvercle d'où il est possible de fermer un ouvrage peut aussi ne pas être assez étanche pour empêcher une infiltration ou une exfiltration d'air de l'extérieur. Suivant le cas à simuler (section de refroidissement ou préchauffage) et le pourcentage d'ouverture des ouvreaux, les travaux qui ont été menés à l'échelle du laboratoire sont synthétisés dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1: Cas étudiés pour la détermination des bilans massiques

	Cas	Entrée	Sortie	Ouverture des ouvreaux	No. de section	Notes
Section préchauffage	N°1	A	Ouvreau 4 (aspiration)	1, 2 et 3 à 5%	Préchauffage 1	B bloquée
	N°2	A	Ouvreau 4 (aspiration)	1, 2 et 3 à 10%	Préchauffage 1	B bloquée
	N°3	A	Ouvreau 4 (aspiration)	1, 2 et 3 à 15%	Préchauffage 1	B bloquée
	N°4	A	Ouvreau 4 (aspiration)	1, 2 et 3 à 20%	Préchauffage 1	B bloquée
	N°5	A	B (aspiration)	(fermés)	Préchauffage 2	-
	N°6	A	B (aspiration)	1, 2, 3 et 4 à 5%	Préchauffage 2	-
	N°7	A	B (aspiration)	1, 2, 3 et 4 à 10%	Préchauffage 2	-
	N°8	A	B (aspiration)	1, 2, 3 et 4 à 15%	Préchauffage 2	-
	N°9	A	B (aspiration)	1, 2, 3 et 4 à 20%	Préchauffage 2	-
Section refroidissement	N°10	Ouvreau 1 (soufflage) + A	B	2, 3 et 4 100%	Refroidissement 5	-
	N°11	A (soufflage)	B	1, 2, 3 et 4 100%	Refroidissement 4	-

3.3 Méthodologie à l'échelle industrielle

3.3.1 Méthodologie de mesure à l'usine

À l'issue de ces mesures, une méthode a été mise au point pour la mesure de vitesse et elle a été testée dans l'usine. Tout d'abord, il était question de délimiter les sections ou cloisons où des mesures de vitesse peuvent être effectuées. Pour ce faire, un thermocouple de type K a été utilisé afin de mesurer les températures à l'entrée/sortie ainsi que les ouvertures car :

- *le tube de Pitot présente une certaine stabilité jusqu'à 850°C et*
- *permet une utilisation sous atmosphère inerte ou oxydante [30].*

Ensuite, à l'aide d'un tube de Pitot (modèle NPL, Kimo, type L) muni d'un micromanomètre (modèle EBT 730, Alnor) permettant de mesurer avec une résolution de ± 0.00001 "H₂O), la mesure des vitesses d'écoulement des gaz chauds a été possible. Malgré qu'en théorie toute la section de refroidissement ainsi qu'une importante partie de la section de préchauffage (compte tenu des températures relativement basses) auraient pu être étudiées, seul l'écoulement dans quelques cloisons a pu être caractérisé comme indiqué sur la figure 3.11.

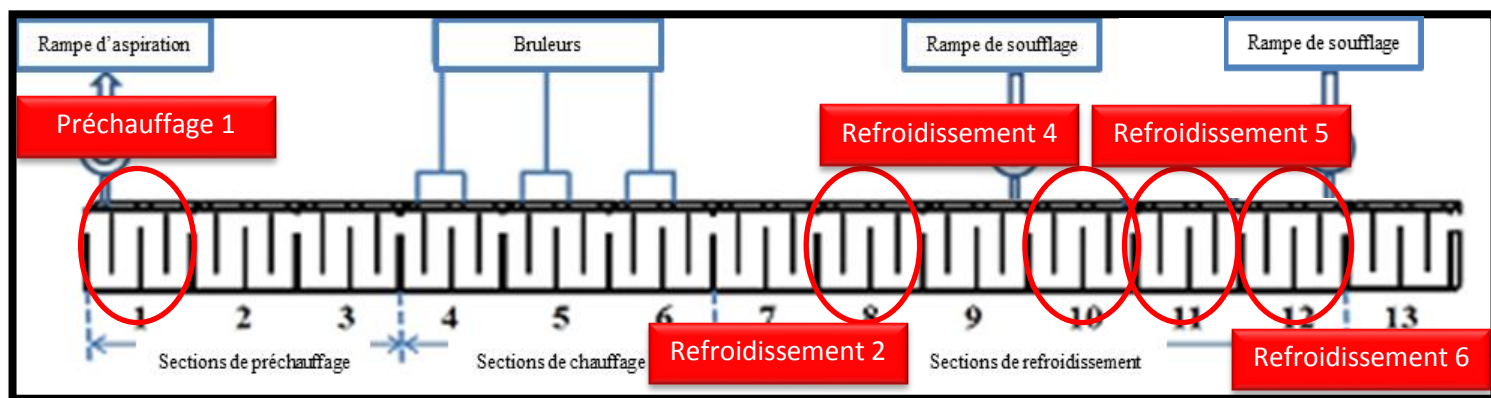


Figure 3.11 : Représentation générale du four de cuisson d'anodes indiquant les sections étudiées [9]

Suivant chaque section étudiée, les mesures de vitesses sont effectuées comme dans la méthodologie à l'échelle du laboratoire (maquette cloison), figure 3.12. La mesure dans les cloisons où s'écoulent les gaz chauds est délicate, le tube de Pitot étant d'une longueur de 2 mètres, cela représente une certaine difficulté de le manipuler. Le maintien de tube de Pitot n'est pas évident, d'autant plus qu'il est indispensable de le garder le plus stable possible avec l'entrée du tube en parallèle à l'écoulement. Il est donc possible d'enregistrer la vitesse et/ou la différence de pression, ΔP , le cas échéant) dès que la valeur de celle-ci se stabilise dans micromanomètre. D'après la figure 3.12 chaque position de l'entrée ou la sortie (l'endroit où s'effectuent les mesures) est désignée par une lettre : E, F, G ou H. Cela permettra alors de distinguer l'emplacement de chaque mesure dans la partie des résultats et interprétation. Comme indiqué sur la même figure, la mesure des vitesses se fait au niveau des ouvreaux aussi afin d'effectuer les calculs des taux d'infiltration ou d'exfiltration. Il est à noter qu'il existe cependant une réelle difficulté pour effectuer des mesures même si le tube de Pitot a été conçu pour résister à des températures avoisinant les 850°C car :

- seule la cloison préchauffage 1 a été étudiée dans toute la section de préchauffage, les températures frôlaient les 600°C , cela fait rougir le tube de Pitot et représente un certain inconfort pour l'opérateur,
- les températures dans la section de chauffage peuvent atteindre les 1250°C rendant ainsi impossible l'utilisation de notre matériel,
- dans la section de refroidissement, quasiment toutes les cloisons ont pu être étudiées mise à part la section de refroidissement 1 et 2, en effet, celles-ci étant proche de la section de chauffage, les températures y sont très importantes pour l'utilisation du matériel (thermocouple de type K et le tube de Pitot).

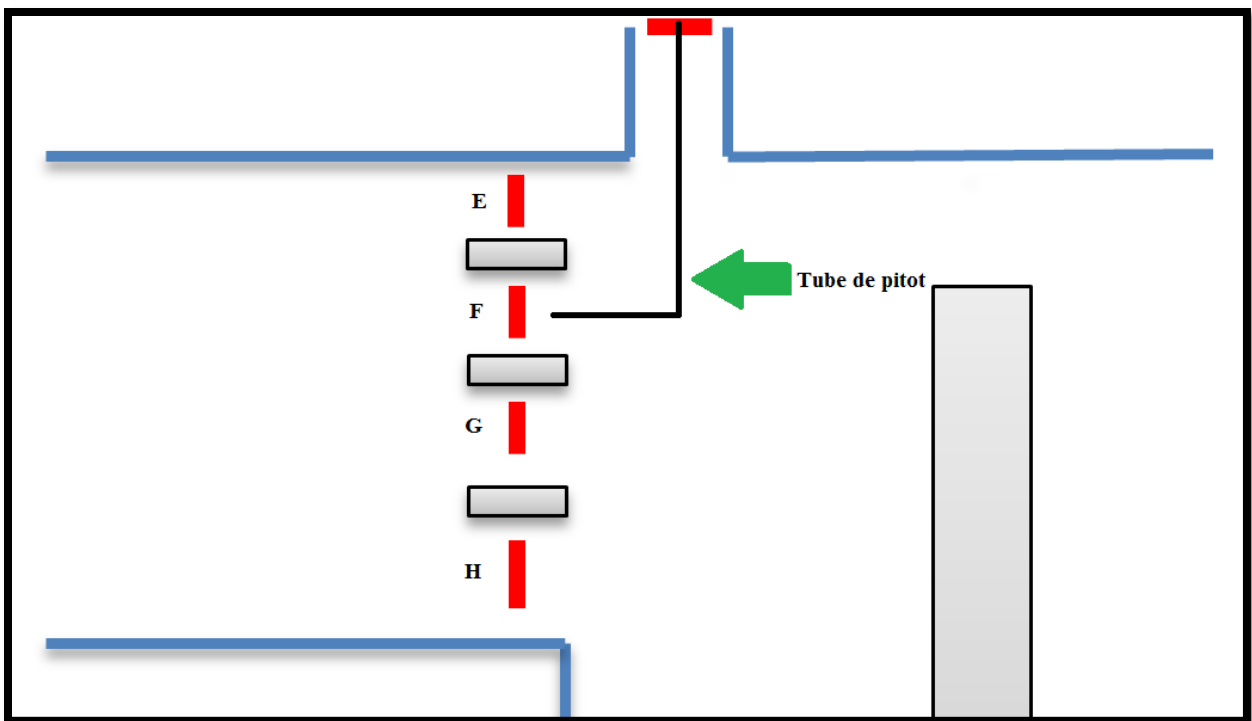


Figure 3.12: Points de prises de mesures de vitesse pour l'entrée/sortie et au niveau des ouvreaux (avec un tube de Pitot)

En dépit de tous ces paramètres, certaines données ont pu être enregistrées permettant ainsi le calcul de la correspondance avec les données obtenues au niveau du laboratoire (maquette).

Cependant il est à noter que l'écoulement est très complexe et qu'il n'y a aucune région où l'écoulement peut atteindre le régime développé. Avec ces données, les bilans de masse ont été calculés pour chaque cloison étudiée et chaque écoulement caractérisé. Les facteurs de correspondance nécessaires ont aussi été obtenus grâce à ces données afin de s'assurer que les données peuvent être utilisées et analysées mais aussi pour reconnaître les possibles erreurs commises lors des prises de mesures.

3.3.2 Méthodologie d'analyse des données de l'usine

Les données recueillis au niveau de l'usine permettent d'effectuer une comparaison avec les données obtenues au niveau de la maquette cloison (à l'échelle du laboratoire), de déterminer les facteurs de correspondance et ainsi de faire les bilans de masse pour les sections étudiées. Ces données sont composées entre autres de :

- *la position de chaque mesure de vitesse au niveau de l'entrée, sortie ou ouvreau,*
- *les températures correspondantes à chaque position,*
- *la Δp ,*
- *vitesse d'écoulement des gaz chauds à chaque point.*

L'appareil de mesure permet d'avoir les débits des gaz chauds qui s'écoulent le long de la cloison seulement si la température au point de mesure déterminé est mesurée.

3.3.2.1 Correction des vitesses mesurées

Afin de standardiser les vitesses mesurées, il est important de les ramener à des vitesses correspondantes à une température de 25°C. Ces mêmes vitesses standardisées vont être ensuite normalisés par souci de confidentialité. Pour ce faire, l'équation suivante a été utilisée :

$$V_{25^{\circ}C} = V_{mesurée} \times \frac{T_{mesurée}}{T_{std}} \quad (3.1)$$

avec :

- $T_{mesurée}$: la température correspondante au point de mesure (en K)
- T_{std} : température de 25°C (298 en K)
- $V_{mesurée}$: vitesse mesurée à la température $T_{mesurée}$

3.3.2.2 Détermination des vitesses réelles au niveau des ouvreaux

Du fait que les mesures de vitesses au niveau des ouvreaux ont été effectuées dans la section de refroidissements 5, 4 et 3, il est important de mentionner qu'au niveau des ouvreaux le profil de vitesse d'écoulement est de type turbulent (démontré plus tard par le calcul dans la partie de résultats et discussion). Théoriquement, pour que le régime turbulent soit établi, il faut y avoir une longueur d'ouveau correspondant à 10 fois le diamètre [28] et ce dans un conduit ordinaire. Cependant, la géométrie actuelle de la cloison (présence de briques et d'entretoises) ne permet pas d'avoir une longueur aussi importante. Dans ce contexte, il est donc nécessaire d'estimer la vitesse moyenne d'écoulement des gaz chauds sortants au niveau des ouvreaux dans la section de refroidissement. L'équation suivante permet d'estimer cette vitesse [24] pour des nombres de Reynolds entre 4×10^3 et 10^5 tout en sachant que les mesures de vitesses ont été effectuées au

milieu des ouvreaux car il n'existe pas une différence significative de la vitesse à d'autres endroits de l'ouverture de l'ouveau (ce qui est une caractéristique d'un régime turbulent). En considérant que le régime est bien établi, on peut trouver la vitesse moyenne par l'équation:

$$\frac{V_{moyenne}}{V_{max}} \cong (1 + 1,33\sqrt{f})^{-1} \quad (3.2)$$

avec dans notre cas :

- $V_{moyenne}$: vitesse moyenne à déterminer
- $V_{max} = V_{25^\circ C}$

Afin de solutionner cette équation il faut donc déterminer f :

$$f = 0,316 \times Re^{\frac{-1}{4}} \quad (3.3)$$

avec :

- Re étant le nombre de Reynolds :

$$Re = \frac{\rho_{air} \times D \times V}{\mu_{air}} \quad (3.4)$$

- D : diamètre de l'ouveau
- μ_{air} : viscosité cinématique de l'air
- V : vitesse d'écoulement donnée

Les calculs ainsi obtenus sont transcrits dans la partie des résultats et discussion permettant ainsi de compléter les données nécessaires pour le calcul des bilans massiques pour chaque section étudiées au niveau de l'usine.

Chapitre 4

Résultats et discussion

4.1 Introduction

Dans ce qui suit, il est question de présentation et de discussion des résultats obtenus à l'échelle du laboratoire, à l'aide des cloisons maquette mises au point, ainsi qu'à l'échelle de l'usine par le biais des travaux de mesures effectuées directement dans le four de cuisson d'anodes en carbone. Dans la partie de méthodologie, la manière avec laquelle ces travaux ont été entrepris et énoncés d'une manière à ce qu'on suit le même acheminement que dans la partie résultats et discussion, à savoir, les travaux au laboratoire suivis par les travaux à l'usine. Dans ce chapitre, on commence d'abord par la visualisation de l'écoulement de l'air à l'intérieur de la maquette cloison afin d'avoir une idée sur les zones où la vitesse d'écoulement est importante et où elle ne l'est pas, de manière à pouvoir la comparer avec la simulation de l'écoulement par la modélisation mathématique. Pour les mesures de vitesse à différents endroits dans la maquette cloison, le choix du nombre de prises par point est discuté afin d'avoir le meilleur nombre de prises en un temps peu contraignant. Comme expliqué dans la méthodologie, les travaux au laboratoire ont été effectués sur deux maquettes cloisons : une maquette à une seule rangée de briques (réplique de la cloison à l'usine) et une maquette à deux rangées de briques issue de la littérature [26]. Les champs de vitesse due à l'écoulement de l'air à l'intérieur de la maquette ont été comparés suivant les différentes géométries. Avec la géométrie issue de la littérature, il n'existe pas de

soucis de confidentialité, par ailleurs, suivant des configurations bien précises (arrangements des entrées/sorties et des ouvreaux), l'étude de l'écoulement en simulant différentes sections du four (figure 2.1) a été effectuée sur cette maquette cloison. En même temps, l'établissement des bilans de masse pour chaque cas est discuté dans ce chapitre. Pareillement, l'étude de l'écoulement dans le four de cuisson d'anodes à l'usine est présentée avec les différents aspects qui y sont reliés : estimation des infiltrations, estimation des exfiltrations et calcul des bilans de masse effectués. À noter que les travaux à l'usine ne concernent que les sections de refroidissement et de préchauffage où les mesures ont été possibles compte tenu des conditions du milieu (surtout les températures très élevées à certains endroits du four).

4.2 Visualisation de l'écoulement

Dans l'optique de visualiser l'écoulement de l'air dans la maquette cloison, de l'air est ramené de l'extérieur grâce à une soufflerie. Dans un même temps, il était question d'injecter de la fumée blanche à l'aide d'une machine à fumée d'une densité élevée afin que l'écoulement d'air devienne 'visible' rendant ainsi possible la visualisation de cet écoulement à travers la géométrie de la maquette cloison. Dans ce sens, cette manipulation a été effectuée sur la maquette cloison de configuration 1 (figure 4.1, maquette fidèle à la cloison usine donc avec une seule rangée de briques) et sur la maquette cloison de configuration 2 (figure 4.2, maquette fidèle au modèle issu de la littérature [26], avec deux rangées de briques). Par souci de confidentialité, la géométrie de la maquette cloison de configuration 1 n'est pas divulguée. Il est possible de facilement distinguer les zones où il existe un écoulement à faible vitesse d'écoulement et vice versa. À noter que l'écoulement est très complexe avec un aspect turbulent dépendant énormément de la géométrie de la cloison maquette.

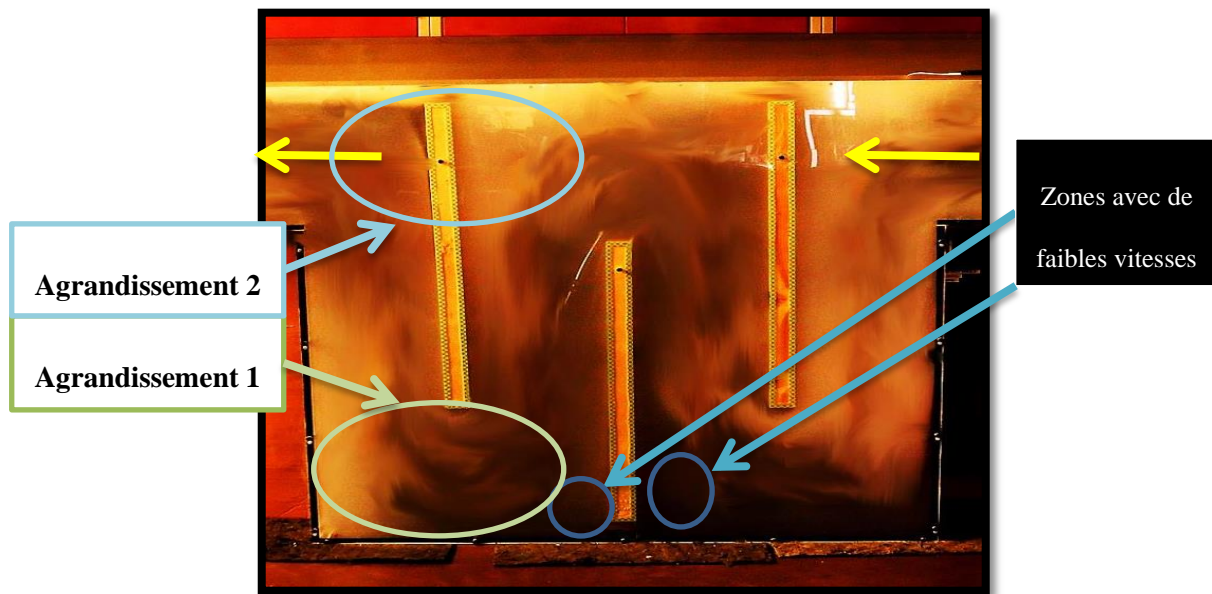


Figure 4.1 : Visualisation de l'écoulement sur la maquette cloison de configuration 1



Figure 4.2 : Visualisation de l'écoulement sur la maquette cloison de configuration 1
(agrandissement 1, voir la figure 4.1)

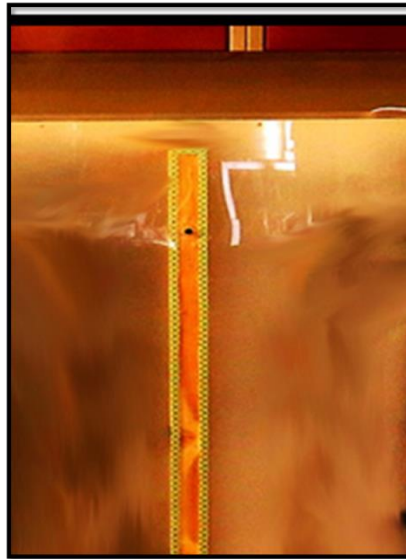


Figure 4.3 : Visualisation de l'écoulement sur la maquette cloison de configuration 1 (agrandissement 2, voir la figure 4.1)

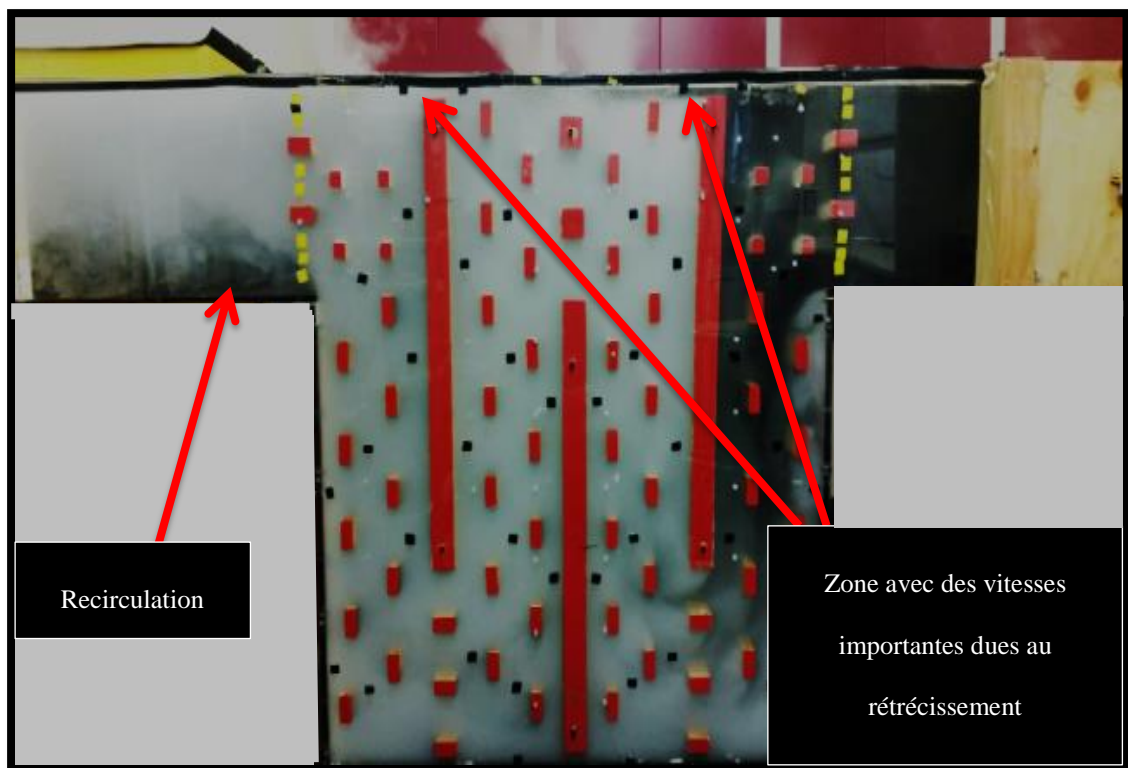


Figure 4.4 : Visualisation de l'écoulement sur la maquette cloison de configuration 2 (géométrie issue de la référence [22])

Il est noté qu'il est assez difficile de capturer le mouvement de l'écoulement de l'air dans la maquette avec une simple caméra. De ce fait, une image de l'écoulement, seule, ne peut pas représenter et expliquer ce qui se passe au niveau de cet écoulement. L'entrée étant de droite, les contours de vitesse sont bien visible et indique :

- *des vitesses importantes au niveau des petites ouvertures au-dessus des chicanes de droite et de gauche ainsi qu'au-dessous de la chicane centrale,*
- *des zones de relativement faibles vitesses en arrière des chicanes,*
- *des zones de reflux notamment vers la sortie.*

4.3 Comparaison des contours de vitesse par la modélisation mathématique

L'écoulement isotherme dans la cloison maquette a été modélisé en utilisant ANSYS et le champ de vitesse est présenté à la Figure 4.5 [31]. Quand on compare le champ de vitesses observé par la visualisation (figure 4.1) et celui calculé par la modélisation mathématique, on peut voir que les deux écoulements sont semblable. La modélisation mathématique de la cloison industrielle a été aussi réalisée [31], et la figure 4.6 montre le champ de vitesse calculé. La comparaison des figures 4.5, 4.6 et 4.1 confirme que la maquette représente fidèlement la cloison de l'usine et les données acquises par les mesures de vitesses sur la maquette peuvent être exploitées par la modélisation. En effet, étant possible de reproduire l'écoulement dans la maquette cloison en utilisant les données recueillies expérimentalement, il est donc possible de prédire les tendances à l'échelle mathématique comme l'incidence que peut avoir un changement dans la géométrie de la cloison (répartition des briques et entretoises).

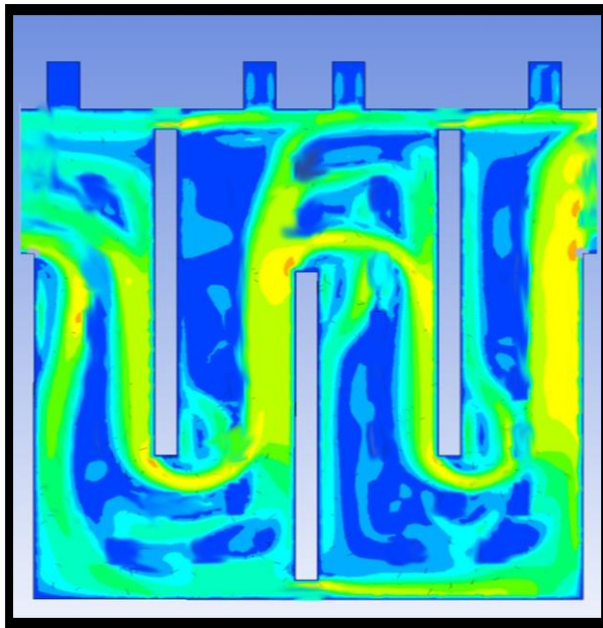


Figure 4.5 : Écoulement calculé par le modèle pour la maquette [31]

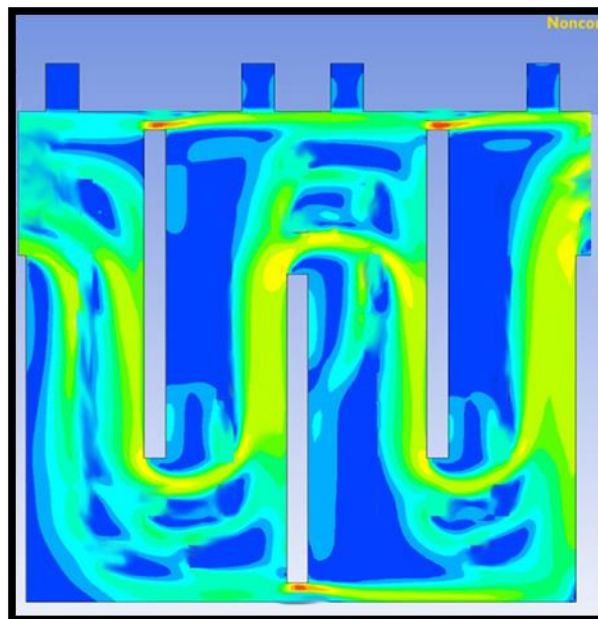


Figure 4.6 : Écoulement calculé par le modèle pour un four industriel [31]

4.4 Choix du nombre de prise de mesure par point

Afin d'avoir une certaine exactitude des données de vitesse mesurée en chaque, le choix a d'abord été porté sur cinq prises par point. Par la suite, dans le but de diminuer le temps de travail par expérience, seulement trois mesures de vitesse ont été pris en considération. En effet, le calcul des variances pour chaque cas indique qu'il est possible d'avoir des résultats tout autant exploitable et exacte avec trois prises de mesure. La figure 4.7 indique clairement que la variance avec trois prises par point (variance moyenne de 0.0010 pour une vitesse moyenne de 0,90 m/s correspondant ainsi à environ 0,11% d'erreurs) est sensiblement plus élevée que la variance avec cinq prises par point (variance moyenne de 0.0007 pour une vitesse moyenne de 0,90 m/s correspondant ainsi à environ 0,07% d'erreurs) permettant ainsi de conclure qu'il est acceptable. Pour ce qui va suivre dans ce rapport, trois mesures de vitesse par point ont été prises.

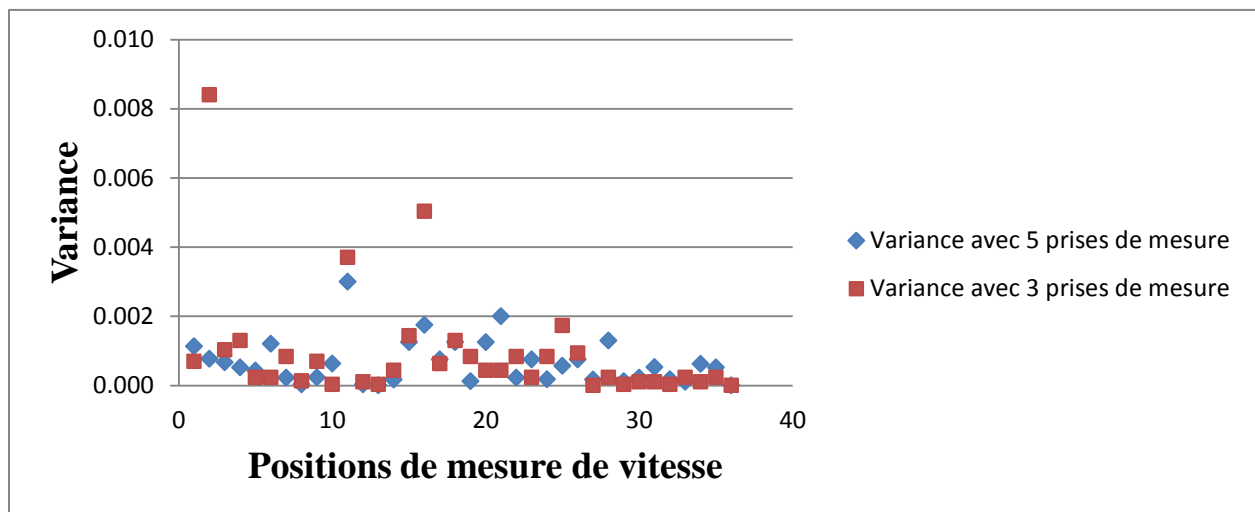


Figure 4.7 : Mesure de variances pour 5 et 3 prises de mesure de vitesse : variance par point (voir figure 3.2)

4.5 Champs de vitesse pour les deux maquettes cloison

Afin de permettre de caractériser l'écoulement de l'air dans la maquette cloison, plusieurs points spécifiques à l'intérieur de celle-ci ont été pris pour déterminer le champ de vitesse. D'après les figures 4.8 et 4.9 on remarque que l'écoulement de l'air suit une certaine logique compte tenu de la présence des briques et des entretoises qui permettent une distribution de celui-ci à travers la maquette cloison. Néanmoins, avec la cloison 2, il est possible de remarquer que la distribution des vitesses (valeurs assez proches) est différente par rapport à l'écoulement dans la maquette cloison 1 tout en prenant en considération qu'il ne s'agit pas de mesures à tous les points. Seules les zones où les vitesses ont été mesurées sont comparables. Ceci pourrait être expliqué par la présence de deux rangées de briques dans la cloison 2. En effet, d'après les intensités de vitesse indiquées par des flèches dans la cloison 1, il existe plusieurs points avec des vitesses importantes à élevées et des zones où les vitesses sont significativement plus faibles. Dans le cas de la maquette cloison 2, une telle disparité des intensités de vitesse est moins importante.

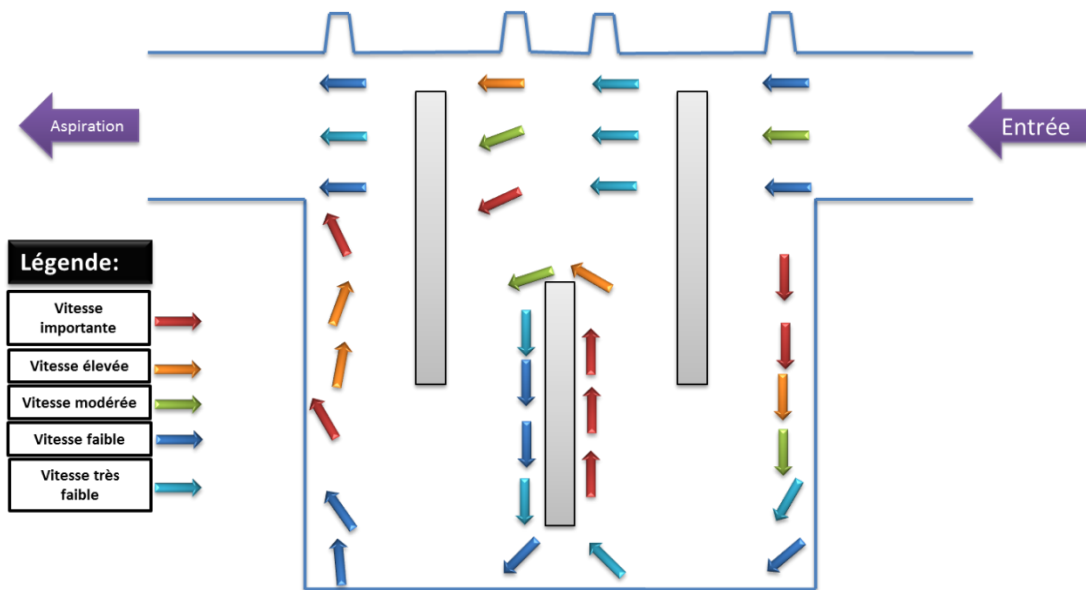


Figure 4.8: Représentation du champ de vitesse pour la maquette cloison 1

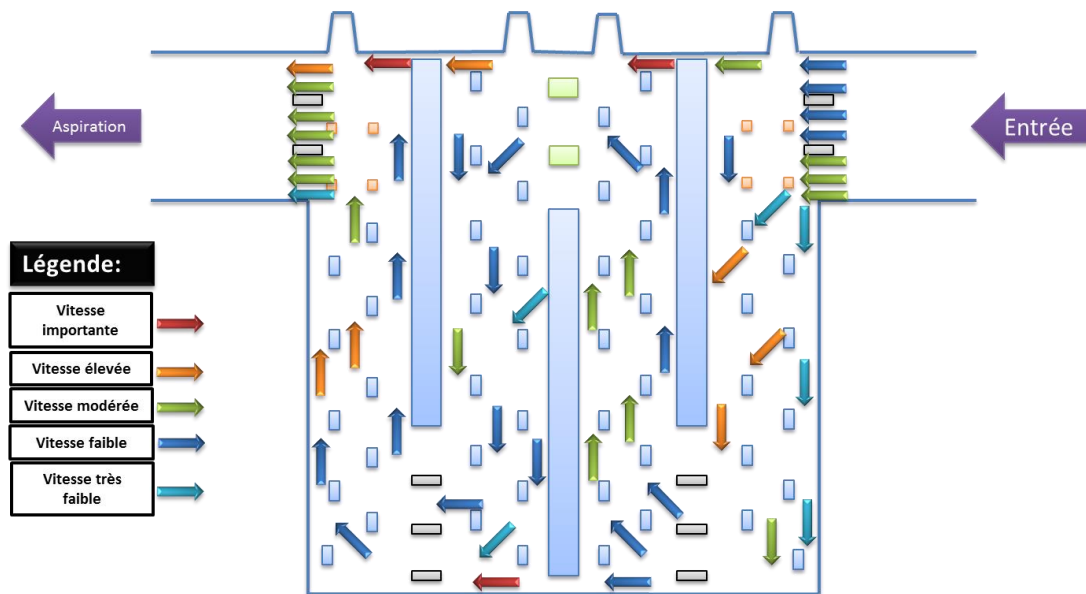


Figure 4.9: Représentation du champ de vitesse pour la maquette cloison 2

4.6 Bilans de masse pour les différentes sections du four (maquette de configuration 2)

Les bilans de masse pour chaque section du four permettent la reconnaissance, suivant une configuration donnée de la maquette cloison de la précision des mesures effectuées. En effet, le calcul des bilans se fait suivant le rapport du débit sortant par le débit entrant

$$\left(\frac{\text{débit total sortant}}{\text{débit total entrant}} \right) \times 100 \quad (4.1)$$

indiquant ainsi un pourcentage qui permet de juger s'il en est possible d'exploiter les résultats issus des mesures de vitesse et donc des débits.

Dans ce sens, 4 sections du four de cuisson d'anodes ont été étudiées (figure 4.10), préchauffage 1, préchauffage 2, refroidissement 4 et refroidissement 6 (voir le tableau 3.2). Dans ces sections, il y a l'infiltration et l'exfiltration des gaz qui affectent le débit total des gaz qui circulent dans la cloison.

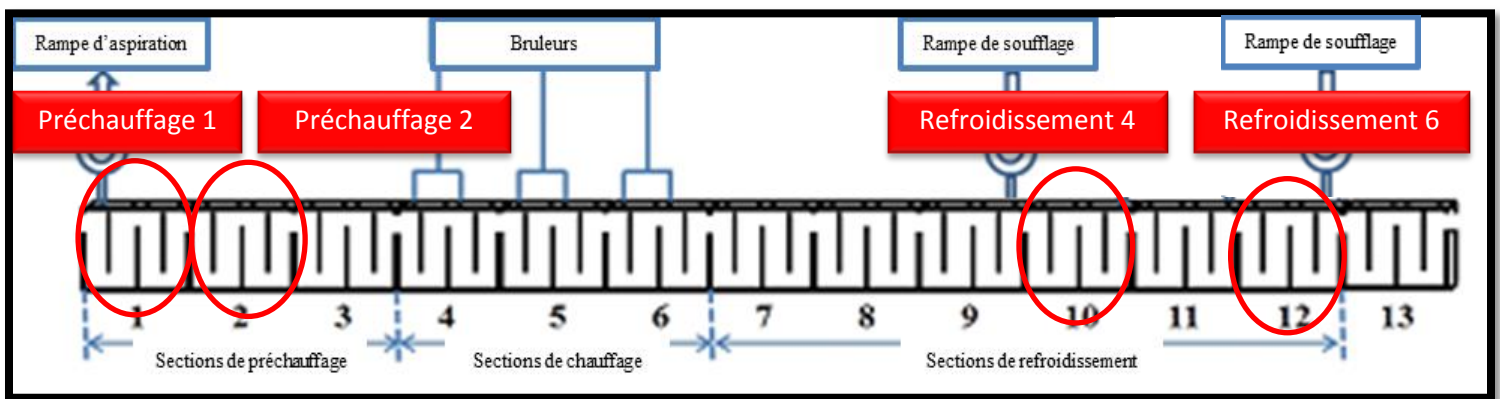


Figure 4.10 : Représentation générale du four de cuisson d'anode indiquant les sections à simuler expérimentalement en utilisant la maquette [9]

En prenant compte la méthodologie expliquée auparavant, la figure 4.11 rassemble les bilans de masse pour tous les cas dont l'écoulement a été simulé. En effet, le calcul des bilans se fait suivant le rapport du débit sortant par le débit entrant indiquant ainsi un pourcentage qui permet de juger s'il en est possible d'exploiter les résultats issus des mesures de vitesse et donc des débits mais, ces résultats peuvent indiquer ce qui se passe à l'intérieur de la cloison en terme d'apport d'air extérieur.

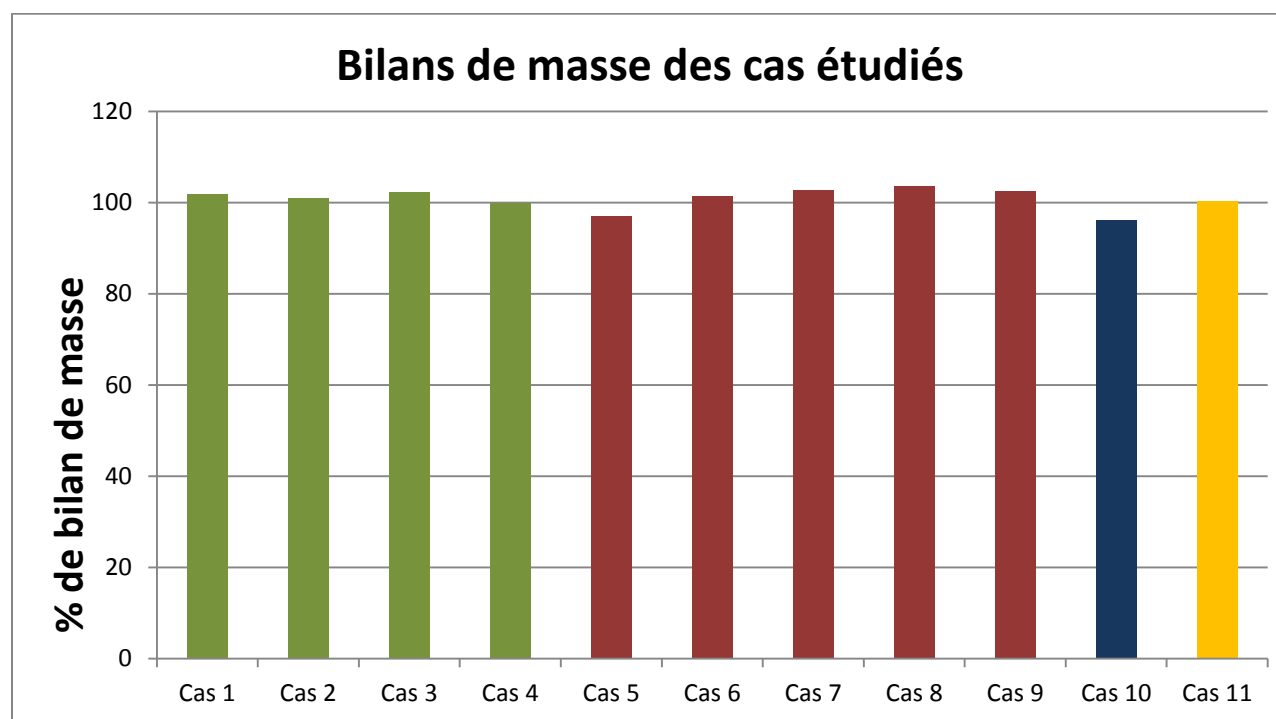


Figure 4.11 : Résultats des bilans de masse pour les sections simulés (Préchauffage 1 en vert, Préchauffage 2 en rouge, refroidissement 6 en bleu et refroidissement 4 en jaune)

D'après ce graphique il est possible de constater que les bilans de masse pour chaque cas (décrit dans le tableau 3.1) varient entre 96,13 et 103,71% ayant une moyenne globale de 100,81% permettant ainsi de les exploiter afin de déterminer la part d'infiltration ou exfiltration globale mais pour chaque ouvrage aussi. Bien évidemment, les variations qui peuvent être observées ($\pm 4\%$ dans ce cas) sont dues à des erreurs de mesures de vitesse pour un ou plusieurs points ainsi que la

variation de la puissance de soufflage ou aspiration sensible à plusieurs facteurs environnants. En considérant le système et la complexité de l'écoulement, cela est acceptable.

4.6.1 Résultats pour la section de préchauffage 1

Afin de permettre de simuler cette section du four, une application d'aspiration à partir de l'ouvrage 4 ainsi qu'un blocage de l'entrée B a été mise en place afin que cela soit représentatif de la cloison à l'usine (voir figure 4.10). Ainsi pour les ouvrages 1, 2 et 3, l'ouverture a été variée entre 5, 10, 15 et 20%. Le but était de quantifier l'impact d'un tel degré d'ouverture (en l'occurrence considéré comme infiltration dans ce cas) sur la répartition du débit d'air entrant dans la maquette cloison mais aussi pour matérialiser le plus possible l'infiltration à l'usine qui provient de plusieurs de plusieurs endroits et difficilement estimable.

4.6.1.1 Préchauffage 1 avec 5% d'ouverture au niveau des ouvrages

Avec 5% d'ouverture de la surface totale des ouvrages 1, 2 et 3 (ouverture annulaire), les taux d'infiltration dus à cela doivent être en conséquence. L'aspiration étant par l'ouvrage 4, celle-ci crée une pression négative à l'intérieur de la maquette cloison permettant ainsi l'écoulement en tant que tel. Les résultats pour ce cas de préchauffage sont montrés dans la figure 4.12.

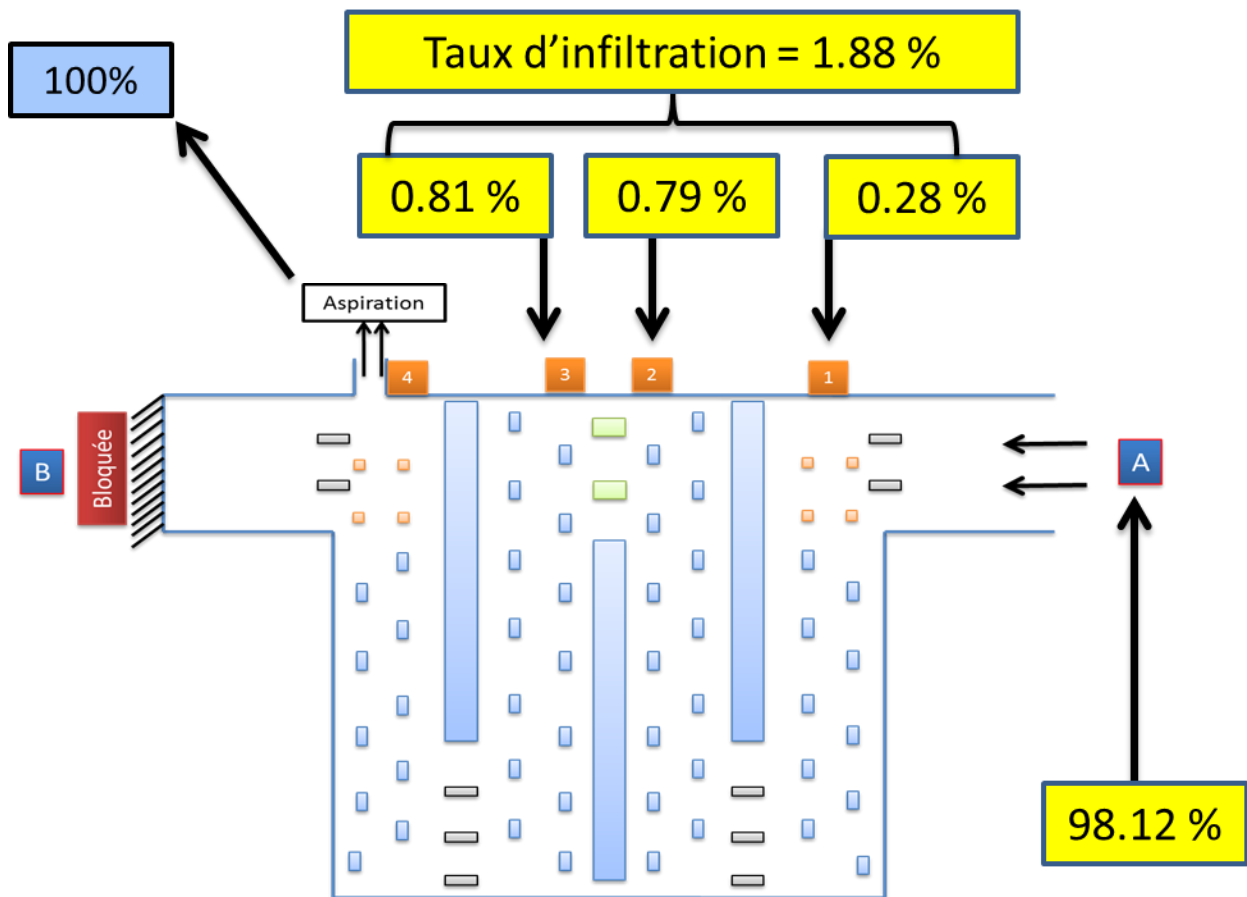


Figure 4.12 : Résultats de simulation de la section de préchauffage 1 avec 5% d'ouverture au niveau des ouvreaux 1, 2 et 3

D'après ces résultats (figure 4.12), il est possible de constater que l'aspiration a permis de ramener essentiellement de l'air de l'extérieur à partir de l'entrée A (98,12%) car celle-ci représente une surface beaucoup plus importante que celle de toutes les ouvertures des ouvreaux réunis. Il est aussi à noter qu'un taux d'infiltration de 1,88% peut représenter un apport considérable d'air extérieur (apport d'oxygène) dans le cas industriel. Aussi, 0,81% (ouveau 3) est plus grand que 0,79% (ouveau 2) due à la proximité avec l'ouveau 4 siège de l'aspiration et de la création de dépression. En effet, l'aspiration étant à partir de l'ouveau 4, la pression négative est la plus importante aux alentours de celui-ci ce qui, par conséquent, indique que

plus l'ouvrage est proche du point d'aspiration, plus il y a apport d'air de l'extérieur à travers ce dernier.

4.6.1.2 Préchauffage 1 avec 10% d'ouverture au niveau des ouvrages

Dans une même optique que le cas précédent, il s'agit ici d'augmenter l'ouverture des ouvrages afin de vérifier l'impact sur le taux d'infiltration. Suivant une même disposition de la maquette cloison (aspiration par l'ouvrage 4), seul le paramètre en pourcentage d'ouverture des ouvrages a varié. Les résultats ainsi obtenus sont indiqués dans la figure 4.13.

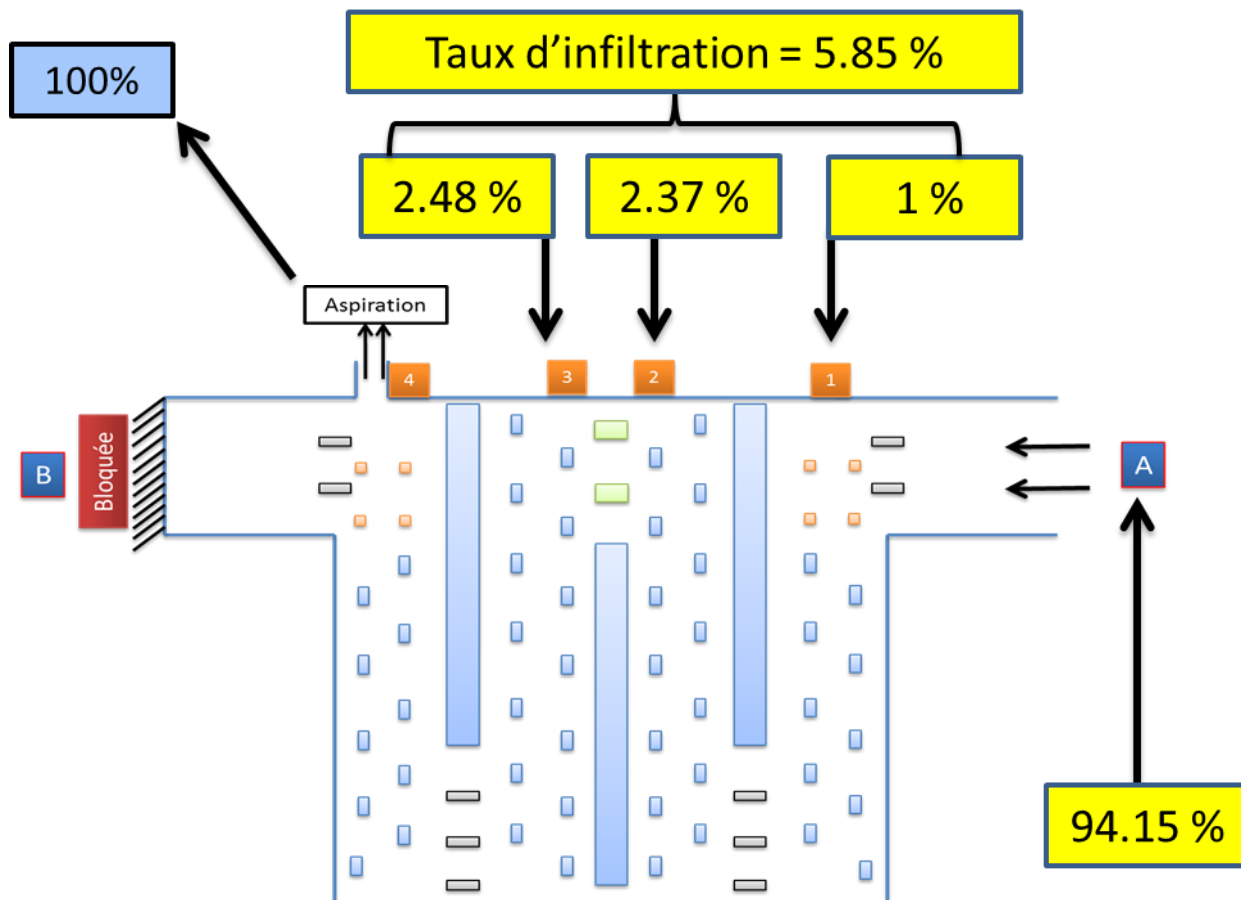


Figure 4.13: Résultats de simulation de la section de préchauffage 1 avec 10% d'ouverture au niveau des ouvrages 1, 2 et 3

D'après la figure 4.13, le taux d'infiltration global ainsi que l'infiltration à partir de chaque ouvrage a triplé par rapport au cas de préchauffage avec 5% d'ouverture. Ceci montre alors que le taux d'augmentation de la surface d'ouverture des ouvrages n'est pas forcément proportionnel au taux d'infiltration. L'aspiration étant à partir de l'ouvrage 4, la pression négative est la plus importante aux alentours de celui-ci ce qui, indiquant que plus l'ouvrage est proche du point d'aspiration, plus il y a apport d'air de l'extérieur à travers ce dernier.

4.6.1.3 Préchauffage 1 avec 15% d'ouverture au niveau des ouvrages

Pour ce faire, les ouvertures annulaires aux niveaux des ouvrages sont de 15% afin d'augmenter l'apport de l'air à l'intérieur de la maquette diminuant ainsi celui par l'entrée A. Les résultats alors obtenus sont reportés sur la figure 4.14.

Il est important de constater que les taux d'infiltration (bien que le taux global est de 10,35%) ont été significativement augmentés (pratiquement de 5 fois par rapport au premier cas).

L'apport d'air est ainsi diminuer par l'entrée A. Il est tout aussi important de constater que les taux d'infiltration par les ouvrages 2 et 3 est constamment sensiblement très proches en termes de quantité montrant ainsi l'importance de la proximité avec l'ouvrage siège de l'aspiration responsable de l'établissement d'une pression négative nécessaire pour créer l'écoulement et ainsi apporter de l'air de l'extérieur.

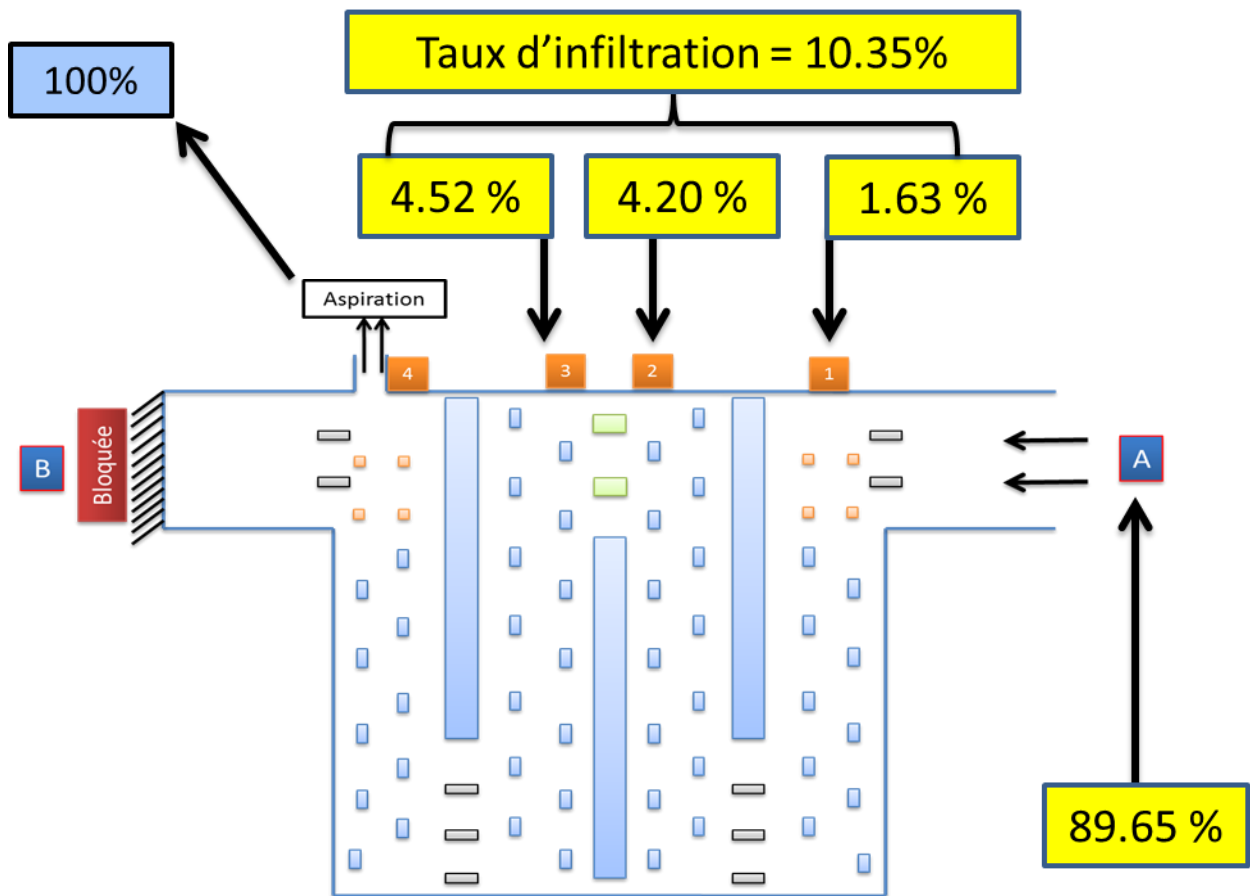


Figure 4.14: Résultats de simulation de la section de préchauffage 1 avec 15% d'ouverture au niveau des ouvreaux 1, 2 et 3

4.6.1.4 Préchauffage 1 avec 20% d'ouverture au niveau des ouvreaux

La valeur de 20% d'ouverture au niveau des ouvreaux 1, 2 et 3 a été choisie comme valeur maximale afin de simuler et quantifier les infiltrations. Une ouverture annulaire de 20% est en effet considérable en termes d'apports d'oxygène. Combiner à l'établissement de la pression négative au sein de la maquette cloison, l'apport d'air de l'extérieur pourrait être ainsi assez important. La figure 4.15 montre ainsi les résultats obtenus pour cette configuration.

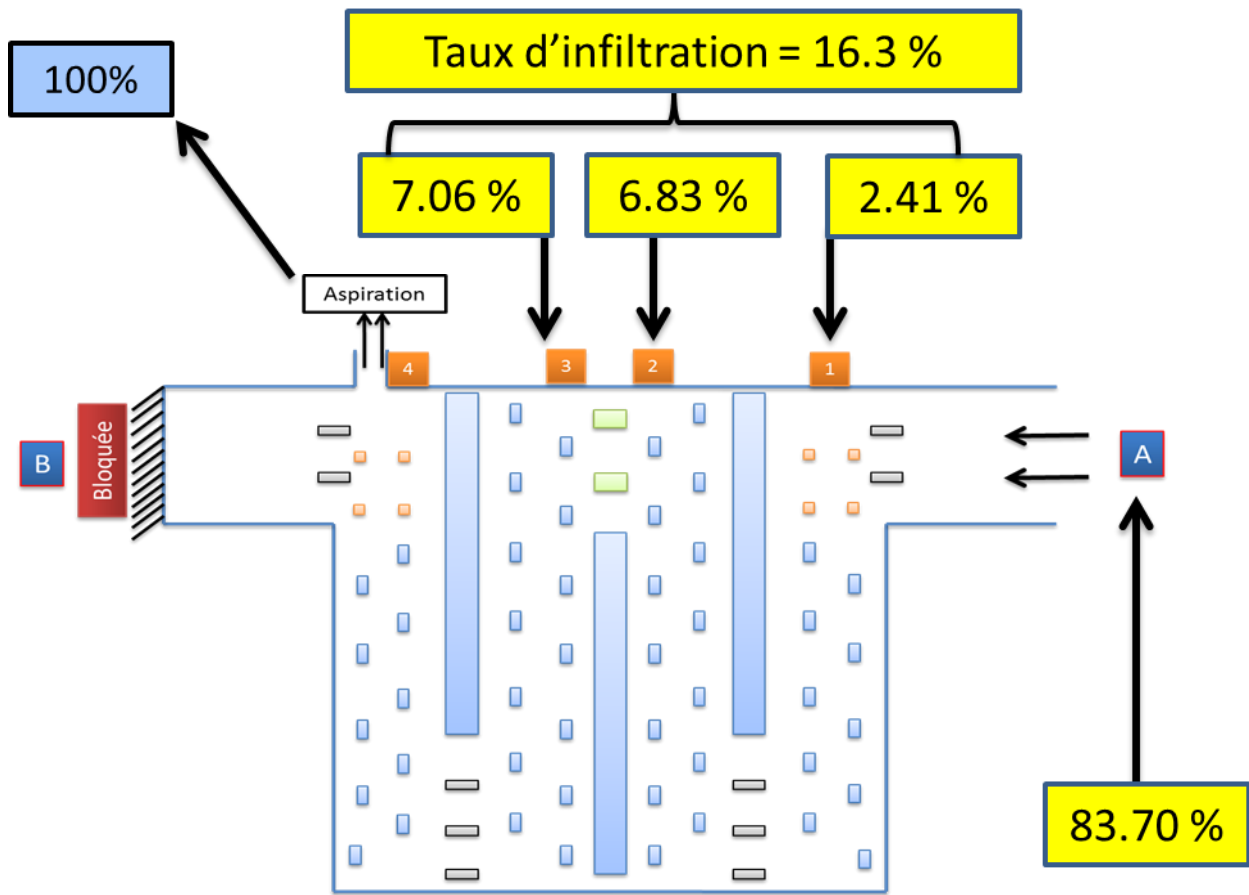


Figure 4.15: Résultats de simulation de la section de préchauffage 1 avec 20% d'ouverture au niveau des ouvreaux 1,2 et 3

Il est à constater que le taux d'infiltration a ainsi pratiquement augmenter de 8 fois par rapport au cas avec 5% d'ouverture des ouvreaux et ce malgré une augmentation de 4 fois de l'ouverture au niveau de chaque ouvrage. Un taux d'infiltration de 16,3% pourrait notamment influencer l'écoulement au sein d'un four industriel de cuisson d'anodes car cela représente une quantité d'air considérable introduite au cours de la phase de préchauffage.

En règle générale, il est possible qu'il existe une variation proportionnelle du taux d'infiltration dans la simulation section de préchauffage 1 au niveau des travaux au laboratoire pour la gamme des pourcentages d'ouverture étudiée. La figure 4.16 en est l'illustration.

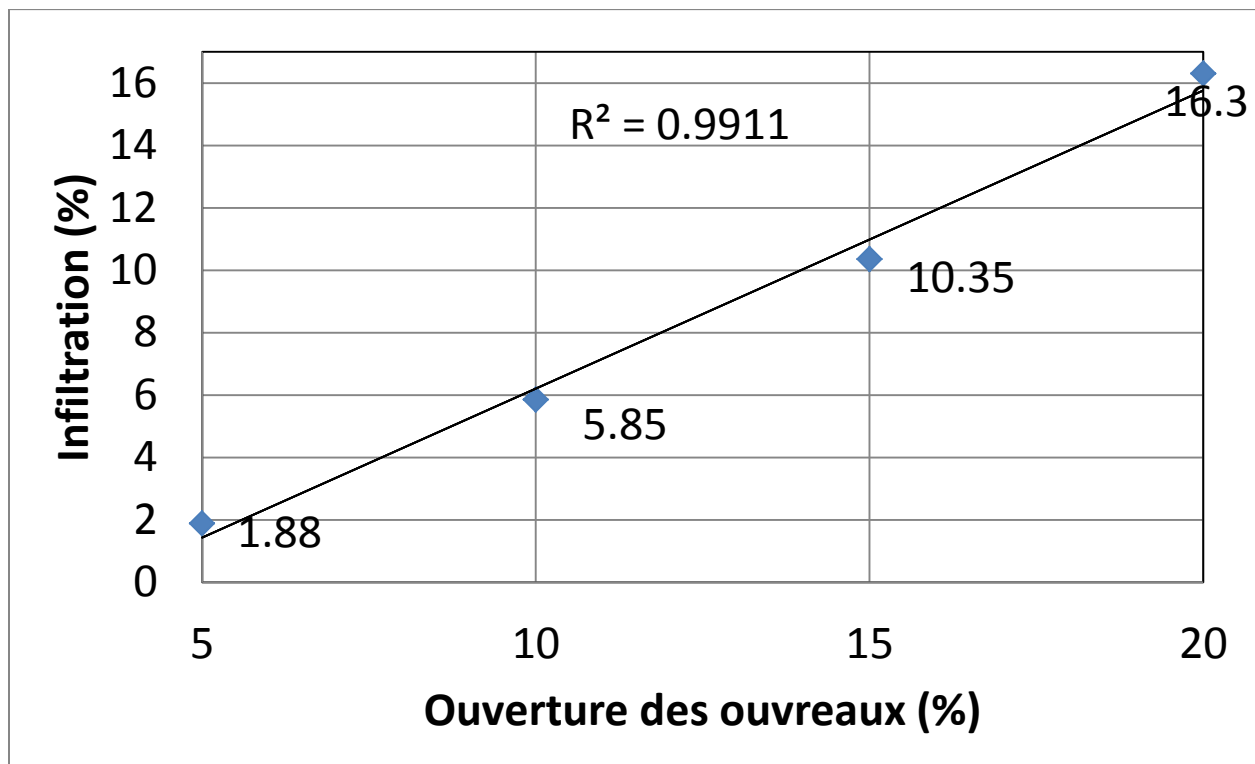


Figure 4.16 : Variation du taux d'infiltration en fonction du pourcentage d'ouverture des ouvreaux - Section préchauffage 1

D'après cette figure, il est évident que le taux d'infiltration augmente avec le pourcentage d'ouverture et ce proportionnellement. Cette courbe récapitulative permet en effet de conclure que les travaux à l'échelle du laboratoire sont représentatifs et exploitables.

4.6.2 Résultats pour la section de préchauffage 2

Afin de permettre de simuler cette section du four, une application d'aspiration à partir de l'entrée B ainsi a été mise en place. Ainsi pour les ouvreaux 1, 2, 3 et 4, l'ouverture a été variée entre 5, 10, 15 et 20%. Le but était de quantifier l'impact d'un tel degré d'ouverture (en l'occurrence considéré comme infiltration dans ce cas aussi) sur la répartition du débit d'air

entrant dans la maquette cloison. La figure 4.10 représente l'emplacement de la section de préchauffage 2.

4.6.2.1 Préchauffage 2 avec 5% d'ouverture au niveau des ouvreaux

Dans la même optique que les travaux précédents, une simulation de la section de préchauffage 2 avec 5% d'ouverture au niveau des ouvreaux permet de quantifier le taux d'infiltration ainsi causé à travers ces derniers. Sachant que l'infiltration se fait à travers tous les ouvreaux, il est intéressant de voir les résultats obtenus par un tel degré d'ouverture. La figure 4.17 indique les résultats.

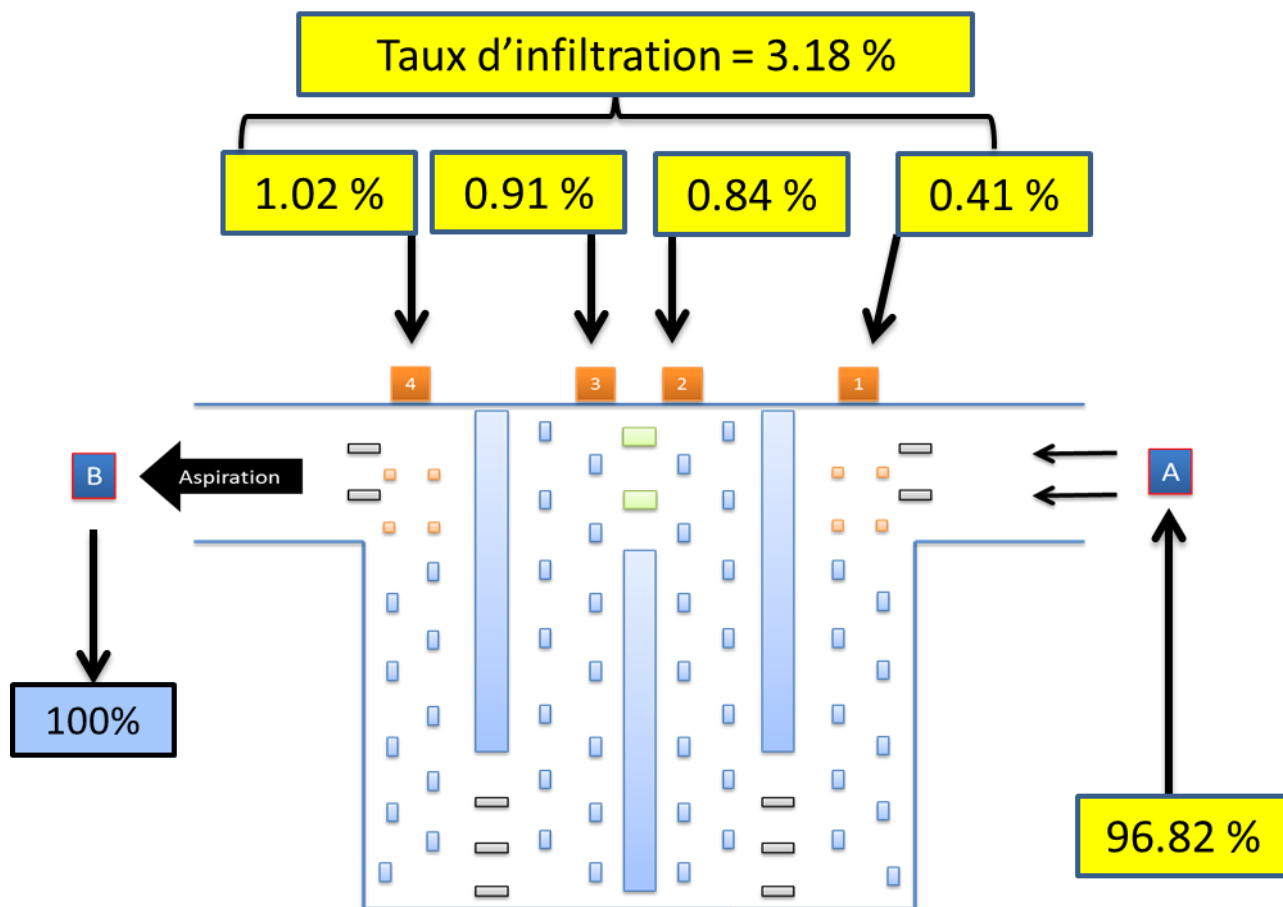


Figure 4.17: Résultats de simulation de la section de préchauffage 2 avec 5% d'ouverture au niveau des ouvreaux

Grâce à ces résultats, il est à constater (d'après la figure 4.17) que le taux d'infiltration global par les 4 ouvréaux est de 3.18%. Ceci étant raisonnable compte tenu surtout de l'apport d'air extérieur par l'ouvréau 4 grâce à une certaine proximité du point d'aspiration B. La pression négative est plus aux alentours de cette sortie, il est donc tout à fait normal d'en extraire plus d'air dans l'ouvréau 4 que l'ouvréau 3, 2 ou 1. Notons aussi que la plus grande partie de l'air extrait de l'extérieur provient de l'entrée A : une quantité représentant un potentiel sectionnement d'une autre cloison voisine.

4.6.2.2 Préchauffage 2 avec 10% d'ouverture au niveau des ouvréaux

Il y a, pour ce cas, un réel intérêt d'augmenter l'ouverture des ouvréaux afin de vérifier l'impact sur le taux d'infiltration. Suivant une même disposition de la maquette cloison (aspiration par le côté B), seul le pourcentage d'ouverture des ouvréaux varie. Les résultats ainsi obtenus sont indiqués dans la figure 4.18.

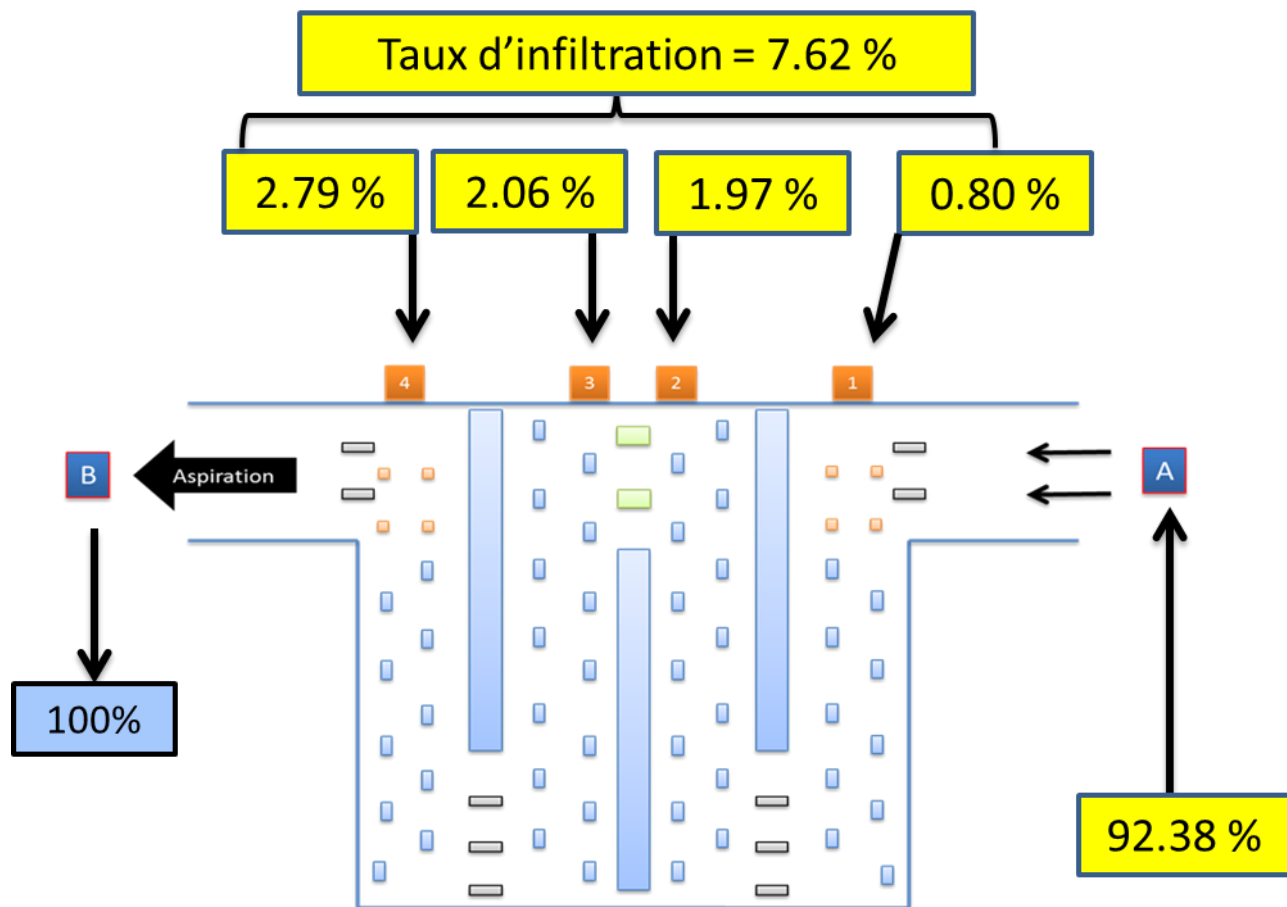


Figure 4.18 : Résultats de simulation de la section de préchauffage 2 avec 10% d'ouverture au niveau des ouvrages

On constate alors que le taux d'infiltration général a plus que doublé par rapport au cas avec seulement 5% d'ouverture au niveau des ouvrages montrant alors une bonne corrélation entre cette augmentation et l'augmentation des pourcentages des ouvertures.

4.6.2.3 Préchauffage 2 avec 15% d'ouverture au niveau des ouvrages

Les ouvertures annulaires aux niveaux des ouvrages sont de 15% afin d'augmenter l'apport de l'air à l'intérieur de la maquette diminuant ainsi celui par l'entrée A. Les résultats alors obtenus sont reportés sur la figure 4.19.

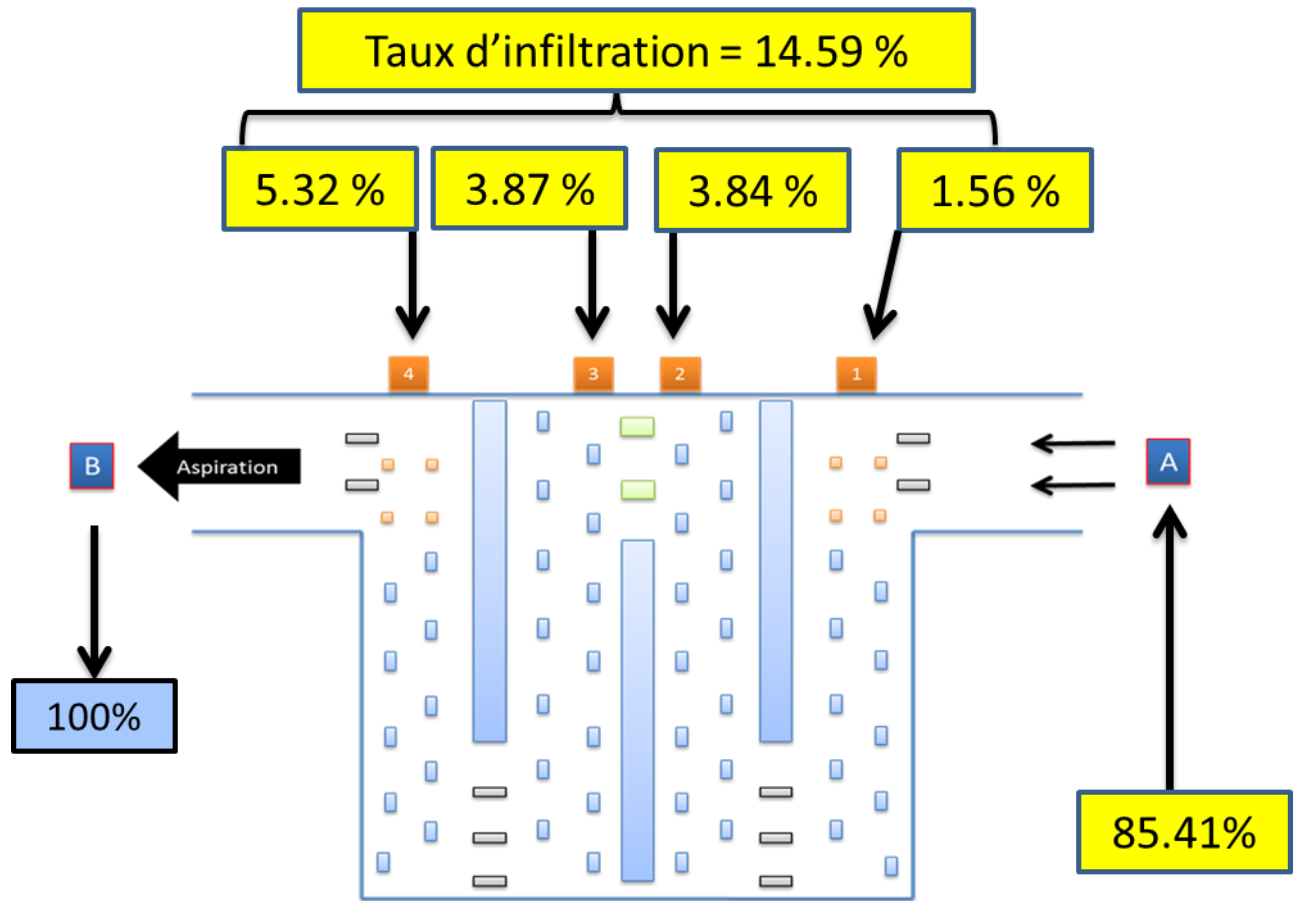


Figure 4.19 : Résultats de simulation de la section de préchauffage 2 avec 15% d'ouverture au niveau des ouvréaux

On obtient ainsi près de 15% d'infiltration au niveau des ouvréaux. Notons aussi que, comme pour les autres cas, plus on est proche du point d'aspiration plus on a de l'infiltration et que la différence entre la quantité d'air apportée de l'extérieur par l'ouvréau 3 et l'ouvréau 2 est sensiblement la même, la pression négative étant pratiquement la même.

4.6.2.4 Préchauffage 2 avec 20% d'ouverture au niveau des ouvreaux

Il est tout aussi pertinent de simuler la section de préchauffage 2 avec 20% d'ouverture au niveau des ouvreaux afin de déterminer l'impact de ces dernières.

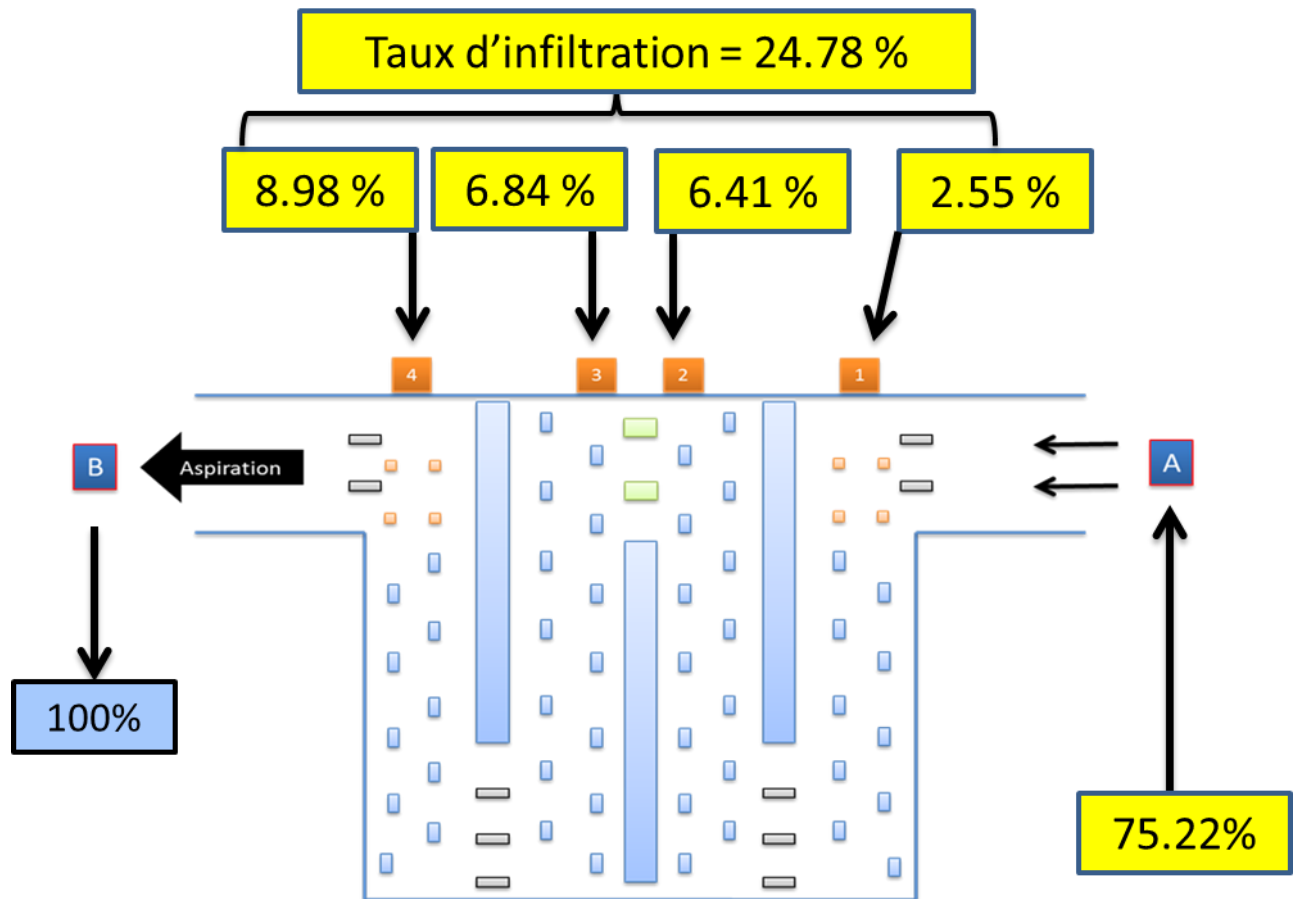


Figure 4.20 : Résultats de simulation de la section de préchauffage 2 avec 20% d'ouverture au niveau des ouvreaux

D'après la figure 4.20, il est possible de constater que le taux d'infiltration par les 4 ouvreaux représente pratiquement $\frac{1}{4}$ de l'air apporté de l'extérieur jusqu'à l'intérieur de la maquette cloison car celui-ci représente maintenant près du quart de l'air global ramené grâce à la pression

négative causé par l'aspiration du côté B. D'un point de vue industriel, cela représente beaucoup d'infiltration nuisible surtout dans la partie de préchauffage.

L'existence d'une variation proportionnelle du taux d'infiltration dans la simulation section de préchauffage 1 au niveau des travaux au laboratoire est à démontrer afin de trouver une corrélation et vérifier la reproductibilité des résultats obtenus. La figure 4.21 montre cette variation.

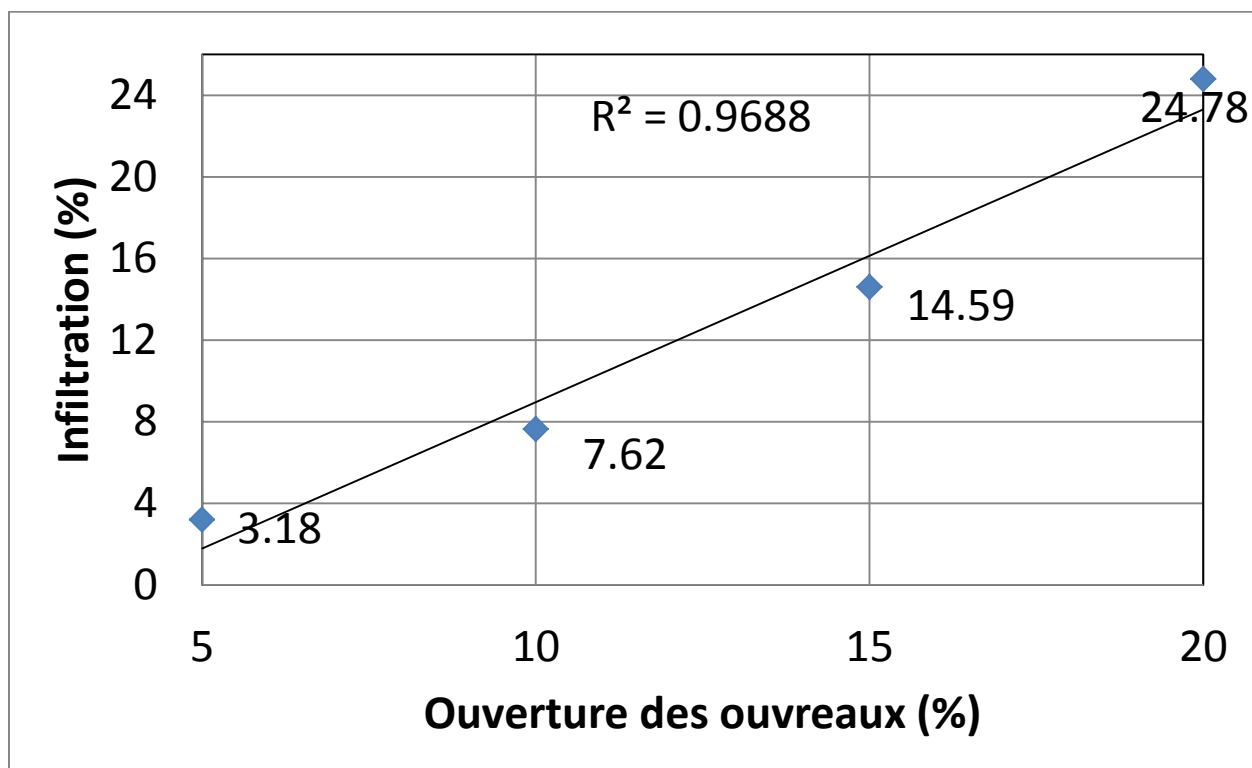


Figure 4.21 : Variation du taux d'infiltration en fonction du pourcentage d'ouverture des ouvreaux-Section préchauffage 2

La figure 4.21 indique qu'il est évident que le taux d'infiltration augmente avec le pourcentage d'ouverture et ce proportionnellement. Cette courbe récapitulative permet en effet de conclure que les travaux à l'échelle du laboratoire sont représentatifs et exploitables car à chaque

augmentation du pourcentage d'ouverture des ouvréaux (une variation de 5% à chaque fois), l'augmentation du taux global d'infiltration est d'environ 50.3% en moyenne.

4.6.3 Résultats pour la section de refroidissement 6

La simulation de cette section du four de cuisson d'anode est d'autant intéressante qu'elle permet de connaître les taux d'exfiltration lors d'un soufflage forcé. En effet, la section de refroidissement 6 (figure 4.10) représente ce type de soufflage moyennant l'ouvréau 1. Lors de la campagne de prise de mesure de vitesse pour la détermination des bilans massique, la maquette cloison est configurée en tant que tel. Une entrée (soufflage) par l'ouvréau 1, avec l'entrée A et B ainsi que les ouvréaux 2, 3 et 4 totalement ouverts (comme lors du soufflage forcé dans l'industrie).

Le soufflage par l'ouvréau 1 va permettre d'avoir une pression positive à l'intérieur de la maquette cloison permettant ainsi l'écoulement de s'établir mais aussi à l'air de s'échapper (exfiltration) par les autres ouvréaux ou bien par la sortie B (comme si il y avait une autre succession de cloison). Les résultats à l'issu de l'étude de ce cas sont indiqués dans la figure 4.22.

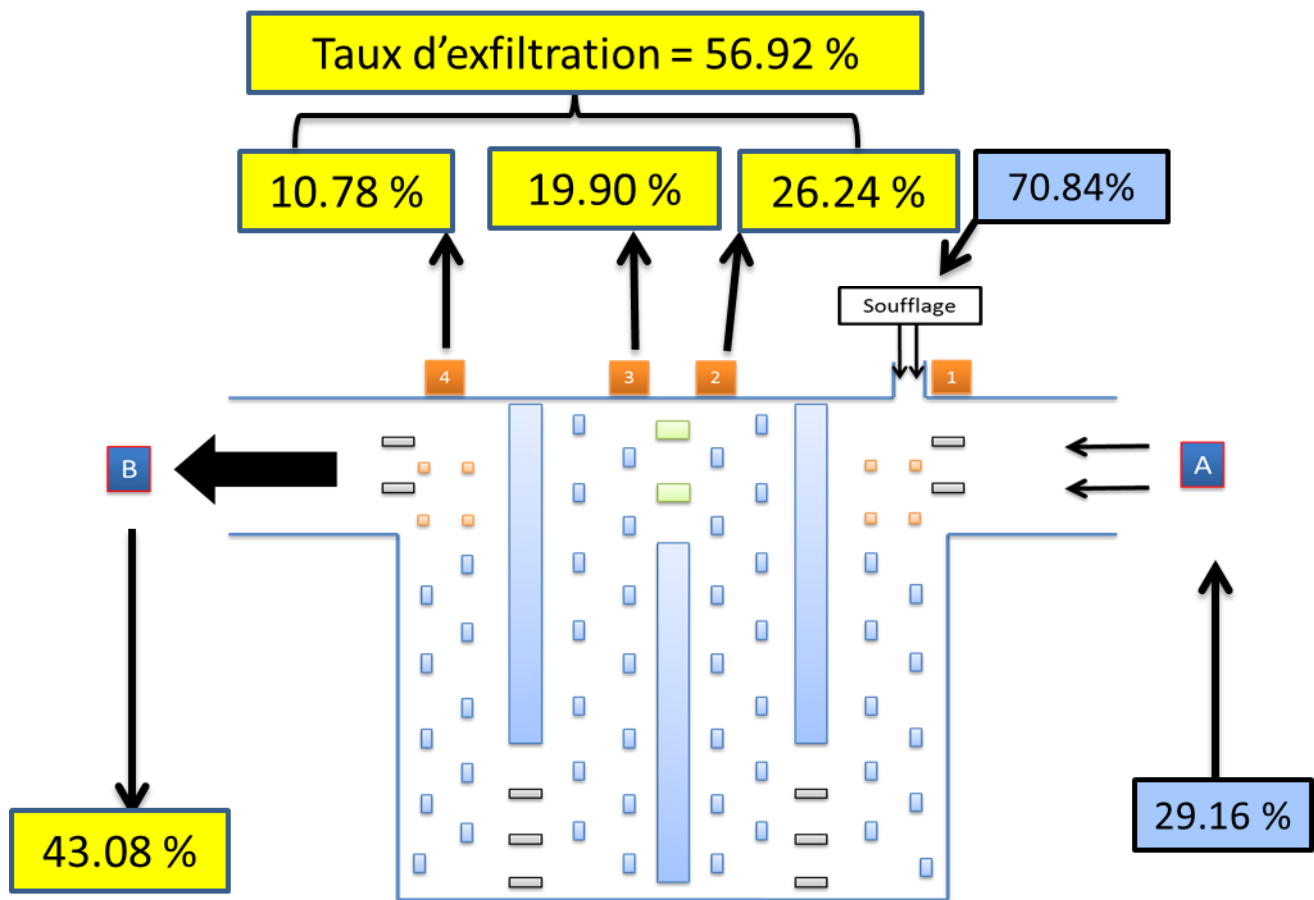


Figure 4.22: Résultats de simulation de la section de refroidissement 6 avec 100% d'ouverture au niveau des ouvréaux

Il est à constater d'après ces résultats que bien que le soufflage est effectué par l'ouvréau 1, l'air ramené à l'intérieur de la maquette cloison à partir de celui-ci ne représente en effet que 70,84%. En effet, grâce à la force d'entraînement exercée par ce soufflage, près de 30% de toute la quantité d'air sectionnée provient de l'entrée A. Aussi il est important de montrer que plus de la moitié (56,92%) de l'air ramené à l'intérieur part par exfiltration à travers les ouvréaux 2, 3 et 4 indiquant ainsi l'important impact de l'ouverture complète des ouvréaux. Seulement, une quantité assez importante (43,08%) passe tout de même jusqu'à la cloison suivante afin de

poursuivre le cycle de refroidissement. Il est à noter que ce soufflage naturel est nécessaire afin de refroidir justement les anodes cuites en fin de cycle de cuisson.

Le soufflage étant par l'ouverture 1, on aura des pressions positives assez importantes aux alentours de cet ouvrage, raison pour laquelle on a plus d'exfiltration par l'ouverture 2 que l'ouverture 3 et 4.

4.6.4 Résultats pour la section de refroidissement 4

La section de refroidissement 4 (voir figure 4.10) représente, dans le four industriel de cuisson d'anodes, l'une des cloison où s'effectue le refroidissement des anodes déjà cuites avec apport d'air 'froid' provenant de la section de refroidissement 5 avec tous les ouvrages ouverts à 100%. Le soufflage s'effectue alors par l'entrée A (dans la maquette cloison) et les ouvrages sont, naturellement, ouverts à 100%. La simulation de cette section va permettre de déterminer le bilan massique global et par conséquent la détermination (estimation) de la quantité d'air qui passe par les ouvrages par exfiltration.

Le soufflage par A génère une grande pression à l'entrée permettant alors à l'écoulement de s'établir mais aussi à l'air de passer à travers les ouvrages car la pression sera alors plus importante que la pression atmosphérique.

Les résultats issus de cette simulation d'écoulement vont permettre d'obtenir le taux d'exfiltration global et à partir de chaque ouvrage. Le tout indiqué dans la figure 4.23.

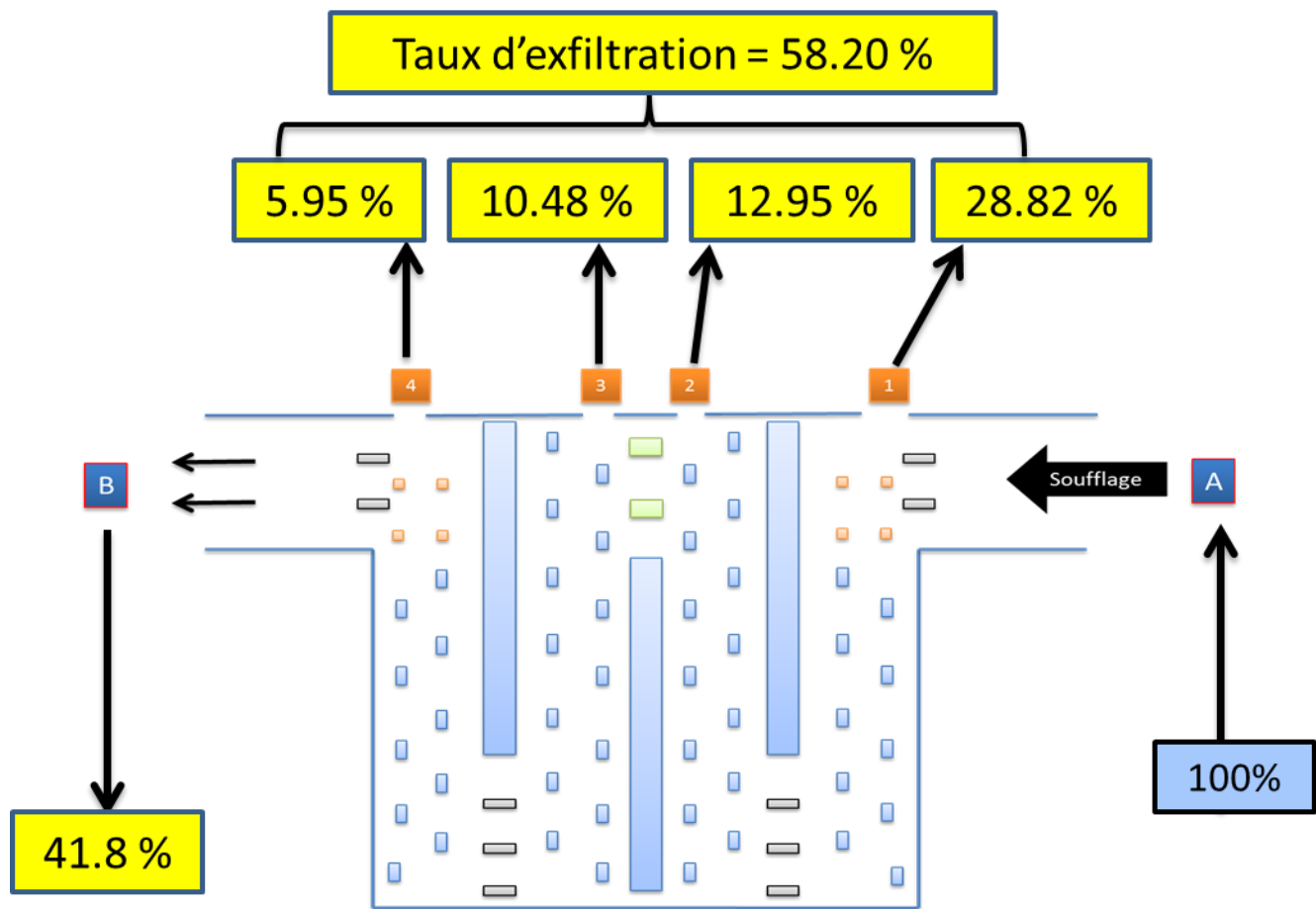


Figure 4.23 : Résultats de simulation de la section de refroidissement 4 avec 100% d'ouverture au niveau des ouvréaux

Il est important ici de rappeler que seule l'entrée A qui participe à 100% de la quantité d'air sectionné jusqu'à l'intérieur de la maquette cloison grâce notamment à la pression positive à l'intérieur de celle-ci.

Le taux d'exfiltration de 58,20% est sensiblement proche à celui obtenu par un soufflage par l'ouvréau 1 (naturel). Ayant 43,08% de quantité d'air provenant de la cloison de préchauffage 5 cette quantité sera encore moindre après le passage par la section de préchauffage 5 puisque seulement 41,80% passe à travers la maquette cloison d'où l'utilité d'avoir une autre rampe de soufflage dans celle-ci. Notons aussi l'exfiltration importante à travers l'ouvréau 1 compte de la pression positive exercée par le soufflage à proximité.

4.7 Résultats des tests à l'usine et bilans de masse

La mesure des vitesses à l'échelle de l'usine a été effectuée par un tube de Pitot moyennant un micromanomètre afin de pouvoir mesurer les différences de pression, ΔP , assez faibles.

Les données obtenues à l'usine sont recueillies afin de trouver les facteurs de correspondance avec les données du laboratoire à savoir en utilisant la maquette cloison de configuration 1 fidèle à l'usine auxquels les résultats obtenus n'ont pas été inclus dans le mémoire par souci de confidentialité. Ces facteurs permettent de déterminer les débits à l'usine. Donc, il est possible d'effectuer une simulation physique pour calculer et caractériser l'écoulement des gaz chauds dans les sections du four horizontal de cuisson d'anodes où les mesures sont prises.

Par souci de confidentialité, toutes les données qui sont exploitées (températures, ΔP , positions, vitesses d'écoulement, etc.) dans les analyses qui vont suivre représentent des valeurs normalisées (par rapport à la valeur maximale de toutes les données dans le système entier).

4.7.1 Analyse des données pour la section de préchauffage 1

Comme indiquée dans la figure 4.24, la section de préchauffage 1 contient une aspiration par l'ouvrage 4 avec une entrée unique à partir de la section de préchauffage 2.

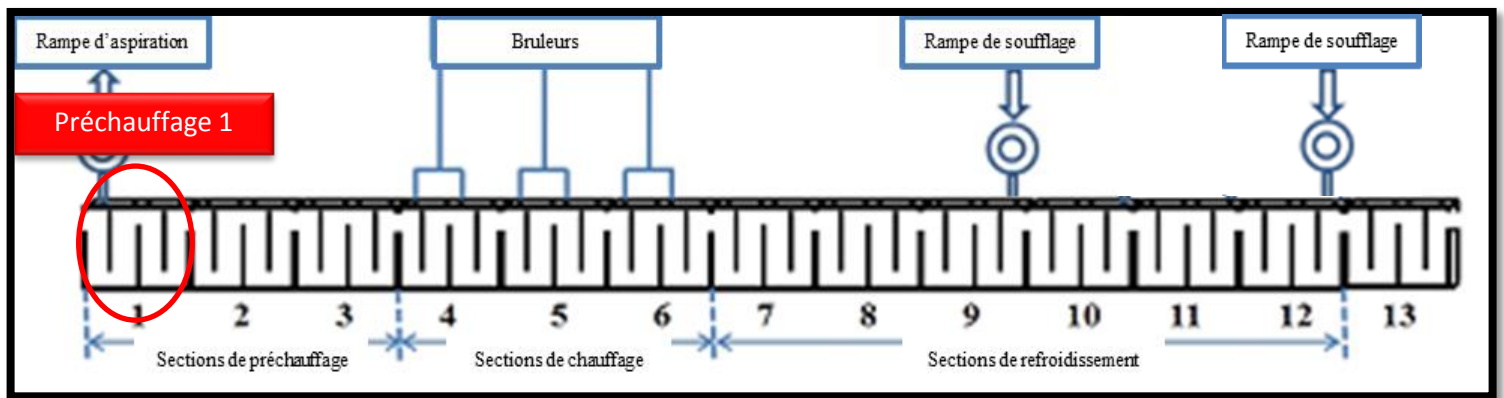


Figure 4.24 : Représentation générale du four de cuisson d'anodes indiquant la section de Préchauffage 1[9]

Les données obtenus à l'issue de l'étude de cette section concerne les mesures de températures et des vitesses aux positions indiquées sur la figure 4.10. Ces données sont rapportées dans le tableau 4.2 avec des valeurs normalisées et à 25°C.

Tableau 4.2 : Données obtenus à l'usine pour la section de préchauffage 1

Position de mesure	Température	$V_{25^{\circ}C}$	ΔP	Débits obtenus
F (à 90cm)	0.44	0.35×10^{-1}	1.00	1.73×10^{-2}
G (à 130cm)	0.47	0.37×10^{-1}	0.94	1.67×10^{-2}

Les données ayant été obtenus ont permis dans un premier temps de déterminer les débits entrants (dans ce cas) d'une manière partielle (seuls les débits dans la zone F et G ont été calculés). Cependant il est tout aussi intéressant de déterminer les débits dans les autres zones d'entrées (à savoir E et H suivant la figure 3.11 dans la partie de méthodologie).

Pour ce faire, une comparaison entre les données obtenus au niveau de l'usine et celles au niveau du laboratoire a été effectuée. Dans ce sens, deux facteurs de correspondance ont été alors

obtenus (en comparant les débits aux zones F et G de la maquette ainsi qu'à l'usine). Voir tableau 4.3.

Tableau 4.3 : Détermination des facteurs de correspondance – Section de préchauffage 1

Position de mesure	Débit au niveau de la maquette	Débit au niveau de l'usine	Facteur de correspondance
F	13.45×10^{-4}	1.73×10^{-2}	12.74
G	12.95×10^{-4}	1.67×10^{-2}	12.84

Il est à remarquer que les données calculées et indiquées dans le tableau 4.3 se basent uniquement sur la comparaison entre les débits entrants par les zones F et G dans l'usine et dans la maquette. Aussi, les tableaux 4.3 et 4.4 bien qu'ils sont semblables et ont pour but de déterminer les facteurs de correction, leur différence réside dans le fait où le tableau 4.3 rend possible la détermination des facteurs de correction en prenant compte les vitesses moyenne à l'entrée F et G dans la maquette cloison tandis que dans le tableau 4.4 les vitesses considérées pour le calcul sont celles qui correspondent à la position exacte de celle où les mesures ont été effectuées à l'usine.

Dans le cas de la maquette, chaque débit calculé représente une moyenne de plusieurs points où les mesures ont été effectuées dans une zone bien déterminée à l'entrée (comme dans le cas de la sortie d'ailleurs). Il est alors indispensable de comparer ces données avec le calcul des débits à la position exacte qui en correspond au niveau de la maquette.

En effet, au niveau de l'usine, seules les positions 90cm, 120cm et 130cm à partir du haut de la cloison ont été étudiées. Par analogie, ces positions peuvent correspondre à des points bien précis

où la mesure de la vitesse a été effectuée au niveau de la maquette. Les résultats de cette autre comparaison sont reportés dans le tableau 4.4.

Tableau 4.4 : Détermination des facteurs de correspondance en considérant la position exacte de mesure de vitesse – Section de préchauffage 1

Position de mesure	Débit au niveau de la maquette	Débit au niveau de l'usine	Facteur de correspondance
F	14.13×10^{-4}	1.73×10^{-2}	12.27
G	13.79×10^{-4}	1.67×10^{-2}	12.17

Avec un facteur global moyen de 12.22 d'après les résultats du tableau 4.4 et un facteur de correspondance global de 12.79 d'après le tableau 4.3, il est possible de déduire qu'il n'en existe pas une grande divergence quant aux résultats obtenus. Il est donc possible de prendre en considération les données (facteur de correspondance global) émanant de la comparaison indiquée dans le tableau 4.3 puisque les données de la maquette y sont plus représentatives car il s'agit d'une moyenne de débits de plusieurs points de mesure pour une même zone.

Toutefois, d'après les résultats indiqués dans le tableau 4.3, il est possible de déterminer un facteur de correspondance global moyen permettant ainsi le calcul des débits dans d'autres zones (en l'occurrence E et H) et par conséquent déterminer le débit global entrant dans la section de préchauffage 1.

Le facteur global émanant est de l'ordre de 12.22. L'estimation des débits dans les zones E et H est alors possible et est rapportée dans le tableau 4.5.

Tableau 4.5: Estimation des débits et du débit global entrant dans la section de préchauffage 1

Position de mesure	Débit au niveau de la maquette	Débit au niveau de l'usine	Débit estimé au niveau de l'usine	Débit global estimé à l'usine
E	10.95×10^{-4}	-	1.40×10^{-2}	7.1×10^{-2}
F	13.53×10^{-4}	1.73×10^{-2}	-	
G	13.02×10^{-4}	1.67×10^{-2}	-	
H	18.01×10^{-4}	-	2.30×10^{-2}	

4.7.2 Analyse des données pour la section de refroidissement 2

Il est à rappeler que la section de refroidissement 2 est la section qui vient juste après le soufflage naturel (figure 4.25) qui a pour but de commencer à refroidir les anodes cuites mais aussi de ramener le maximum de chaleur possible vers la section de chauffage, limitant ainsi la consommation d'énergie nécessaire pour cuire les anodes. Cela justifie donc le fait que les ouvreaux sont totalement fermés dans cette section afin de maintenir cette chaleur (limitation des pertes de chaleur par exfiltration).

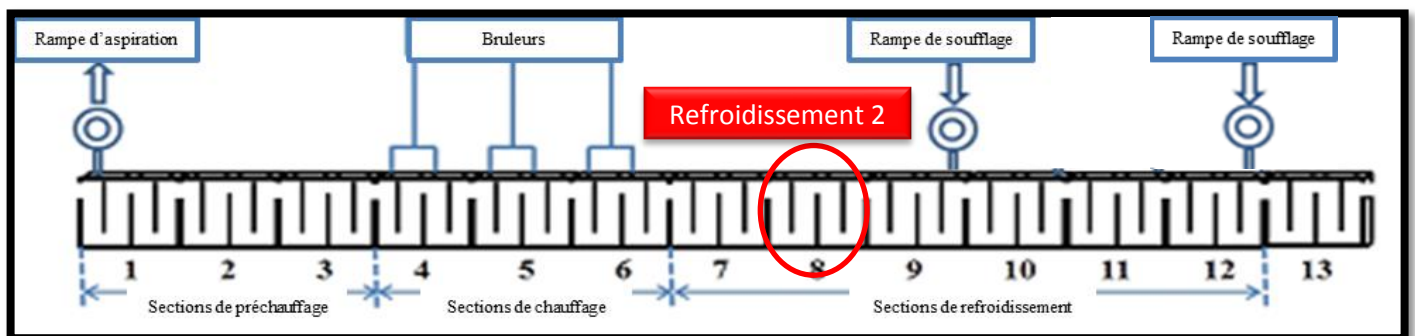


Figure 4.25 : Représentation générale du four de cuisson d'anodes indiquant la section de Refroidissement 2 [9]

Dans la mesure où il est difficile d'effectuer adéquatement les mesures nécessaires, seul les données à la position F ont pu être recueillies (indiquée sur la figure 4.26). En effet, la section

de refroidissement 2 étant très proche de la section de chauffage, les températures des gaz chauds dépassent donc les 650°C.

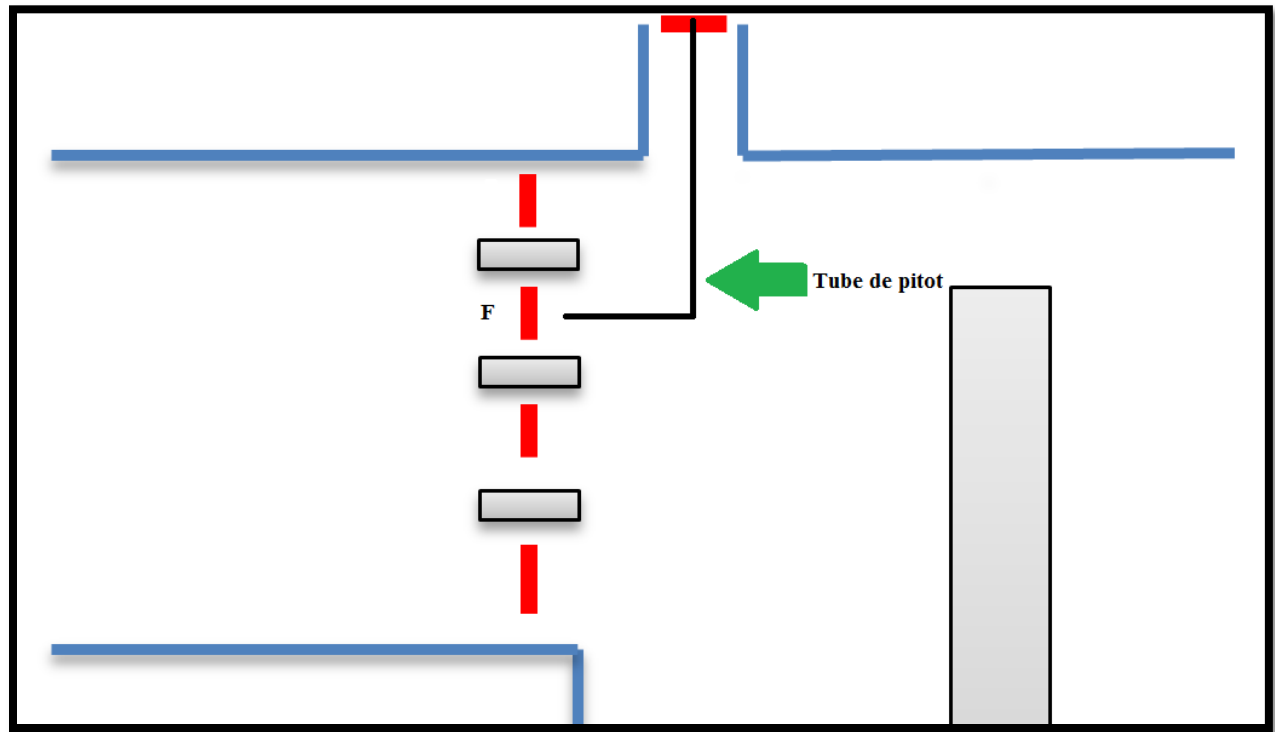


Figure 4.26 : Points de prises de mesures de vitesse pour l'entrée/sortie et au niveau des ouvreaux (avec un tube de Pitot)-Section de refroidissement 2

Par l'étude de l'écoulement dans la section de refroidissement 2, des données ont été rassemblées et synthétisées dans le tableau 4.8 avec des valeurs normalisées et à 25°C.

Tableau 4.8 : Données obtenus à l'usine pour la section de refroidissement 2

Position de mesure	Température	$V_{25^{\circ}\text{C}}$	ΔP	Débits obtenus
F (à 90cm)	0.56	0.27×10^{-1}	1.00	1.34×10^{-2}

Les données ayant été obtenus ont permis dans un premier temps de déterminer les débits entrants d'une manière partielle (seuls les débits dans la zone F calculés). Cependant il est

intéressant de déterminer les débits dans les autres zones d'entrées (à savoir E, G et H suivant la figure 3.11 dans la partie de méthodologie).

Pour ce faire, une comparaison entre les données obtenus au niveau de l'usine et celles au niveau du laboratoire a été effectuée. Dans ce sens, deux facteurs de correspondance ont été alors obtenus (en comparant les débits aux zones F de la maquette ainsi qu'à l'usine). Voir tableau 4.9.

Tableau 4.9 : Détermination des facteurs de correspondance – Section de Refroidissement 2

Position de mesure	Débit au niveau de la maquette	Débit au niveau de l'usine	Facteur de correspondance
F	10.93×10^{-4}	1.34×10^{-2}	12.27

Il est à remarquer que les données calculées et indiquées dans le tableau 4.9 se basent uniquement sur la comparaison entre le débit sortant par la zone F dans l'usine et dans la maquette.

Cependant dans le cas de la maquette, chaque débit calculé représente une moyenne de plusieurs points où les mesures ont été effectuées dans une zone bien déterminée à l'entrée (comme dans le cas de la sortie d'ailleurs). Il est alors indispensable de comparer ces données avec le calcul des débits à la position exacte qui en correspond au niveau de la maquette.

En effet, au niveau de l'usine seule la position 90cm à partir du haut de la cloison a été étudiée. Par analogie, ces positions peuvent correspondre à des points bien précis où la mesure de la vitesse a été effectuée au niveau de la maquette. Les résultats de cette autre comparaison sont reportés dans le tableau 4.10.

Tableau 4.10 : Détermination des facteurs de correspondance en considérant la position exacte de mesure de vitesse – Section de refroidissement 2

Position de mesure	Débit au niveau de la maquette	Débit au niveau de l'usine	Facteur de correspondance
F	10.77×10^{-4}	1.34×10^{-2}	12.46

Avec un facteur global moyen de 12.46 d'après les résultats du tableau 4.10 et un facteur de correspondance global de 12.27 d'après le tableau 4.9, il est possible de déduire qu'il n'en existe pas une grande divergence quant aux résultats obtenus. Il est donc possible de prendre en considération les données (facteur de correspondance global) émanant de la comparaison indiquée dans le tableau 4.9 puisque les données de la maquette y sont plus représentatives car il s'agit d'une moyenne de débits de plusieurs points de mesure pour une même zone.

Toutefois, d'après les résultats indiqués dans le tableau 4.9, il est possible de déterminer un facteur de correspondance global moyen permettant ainsi le calcul des débits dans d'autres zones (en l'occurrence E, G et H) et par conséquent déterminer le débit global entrant dans la section de refroidissement 2.

Le facteur global émanant est de l'ordre de 12.46. L'estimation des débits dans les zones E, G et H est alors possible et est rapportée dans le tableau 4.11.

Tableau 4.11 : Estimation des débits et du débit global entrant dans la section de refroidissement 2

Position de mesure	Débit au niveau de la maquette	Débit au niveau de l'usine	Débit estimé au niveau de l'usine	Débit global estimé à l'usine
E	16.19×10^{-4}	-	2.02×10^{-2}	18.94×10^{-2}
F	10.96×10^{-4}	13.44×10^{-2}	-	
G	11.89×10^{-4}	-	1.48×10^{-2}	
H	16.08×10^{-4}	-	2.00×10^{-2}	

4.7.3 Analyse des données pour la section de refroidissement 4

La section de refroidissement 4 est caractérisée par une température des gaz chauds relativement peu importante. Les ouvreaux sont dans ce cas totalement ouverts, permettant ainsi un refroidissement rapide des anodes cuites. L'air ainsi sortant de ces ouvreaux est celui provenant du soufflage forcée dans le four de cuisson des anodes. La figure 4.27 indique la position exacte de la section concernée dans le four.

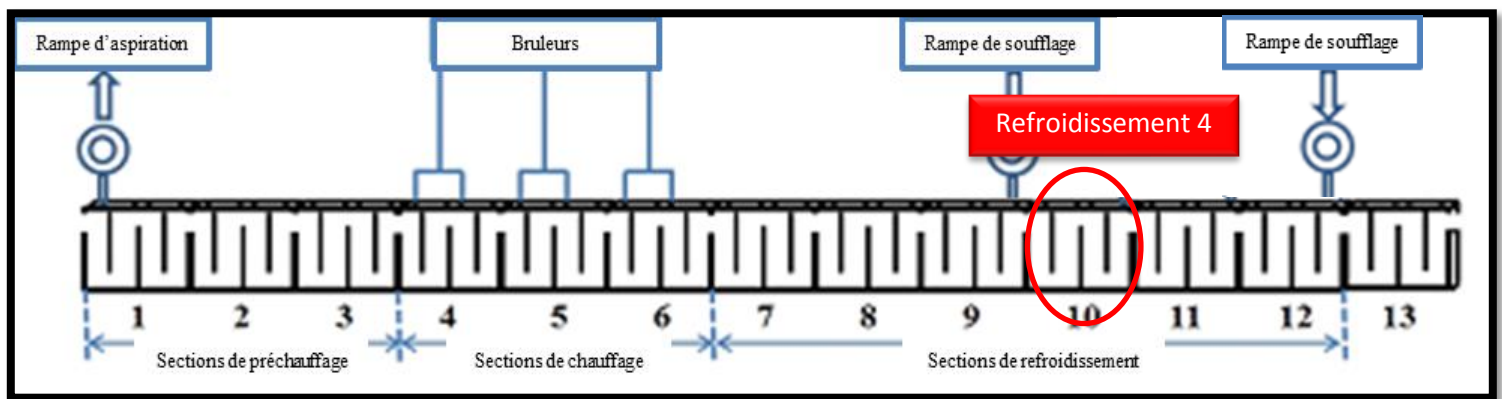


Figure 4.27 : Représentation générale du four de cuisson d'anodes indiquant la section de Refroidissement 4 [9]

Avec des températures de milieu avoisinant les 300°C dans cette section, la mesure des données nécessaires pour l'étude de l'écoulement a été relativement facile par rapport aux sections étudiées précédemment. Ainsi, les températures, les positions et les vitesses ont pu être mesurées dans les zones E, F, G et H de l'entrée ainsi qu'au niveau des ouvreaux 1, 2, 3 et 4, voir figure 4.28.

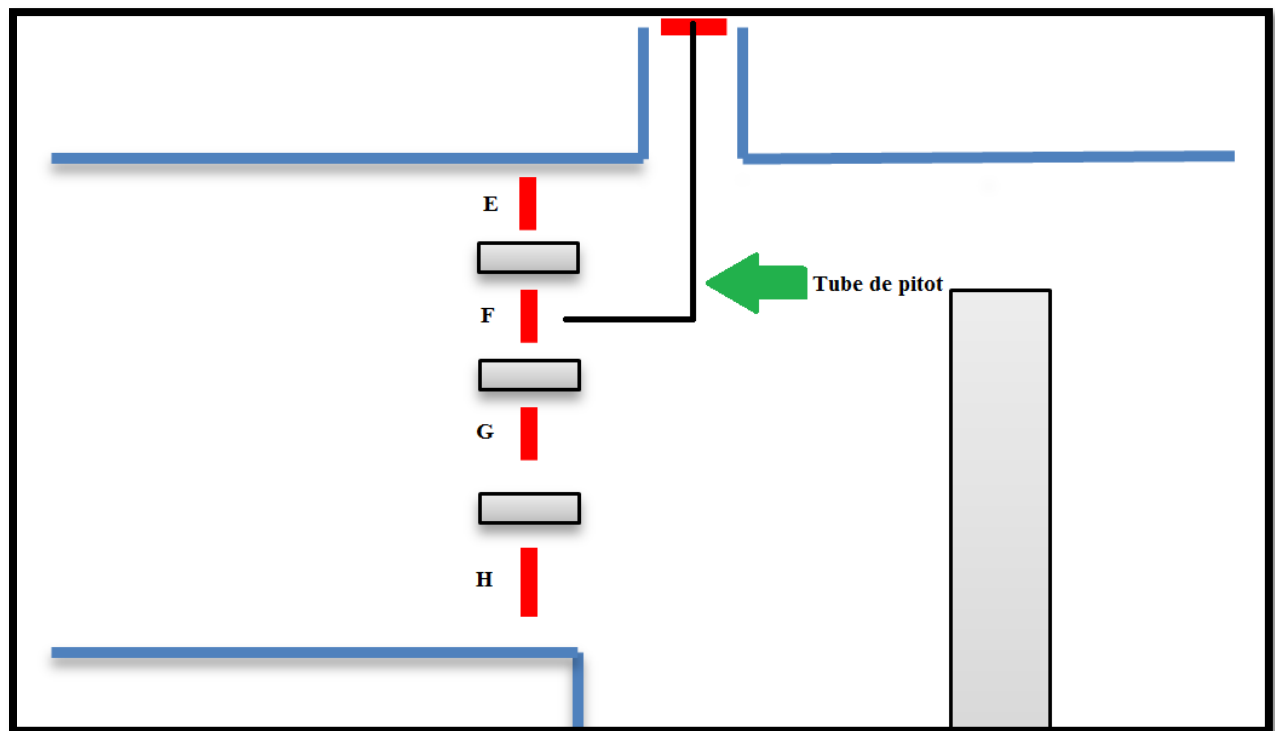


Figure 4.28 : Points de prises de mesures de vitesse pour l'entrée/sortie et au niveau des ouvreaux (avec un tube de Pitot)-Section de refroidissement 4

Suivants ces points de mesure de vitesse (et autres données), les données obtenues sont reportées dans le tableau 4.13 indiquant la position, la vitesse et la température en chaque point ainsi indiqué. Ces données sont, par souci de confidentialité, normalisées et correspondent à des données à 25°C afin d'uniformiser l'étude de toutes les sections.

Ces données vont permettre tout d'abord de déterminer les débits entrants à savoir à partir de l'entrée composée de la zone E, F, G et H mais aussi les débits sortants par chaque ouvreaux et donc la détermination du débit sortant total permettant ainsi de connaître le bilan massique résultant.

Dans un souci de rapprochement des valeurs des données obtenues (vitesses) le plus possible de la réalité, le calcul de la vitesse réelle du débit sortant de chaque ouvreaux a été nécessaire. En effet, comme expliqué dans la partie de méthodologie à l'échelle de l'usine, ce calcul est indispensable compte tenu de la nature du régime (turbulent) à la sortie des ouvreaux. Ce régime n'étant pas totalement établi, le calcul de la vitesse moyenne qui prend compte de la position de mesure à la sortie de l'ouvreaux au niveau de l'usine est nécessaire. En l'occurrence, dans notre cas, au milieu de la sortie, à savoir la vitesse maximale. Les calculs obtenus sont alors rapportés dans le tableau 4.12 suivant cette l'équation 3.2.

Tableau 4.12 : Calcul de la vitesse moyenne de l'écoulement à la sortie des ouvreaux – Section de refroidissement 4

Ouvreaux	$V_{max} = V_{25^{\circ}C}$	$\frac{V_{moyenne}}{V_{max}}$	$V_{moyenne}$
1	0.22	0.83	0.18
2	0.23	0.83	0.19
3	0.23	0.83	0.19
4	0.20	0.83	0.17

D'après ces données, il est possible de remarquer que le rapport de la vitesse réelle par la vitesse maximale (la vitesse calculée à la sortie de chaque ouvreaux) est en moyenne de 0.83. Cela indique donc que la vitesse moyenne sortant des ouvreaux correspond à environ 83% de la vitesse maximale mesurée à l'aide du tube de Pitot. Cette hypothèse a donc permis de connaître

les vitesses avec lesquelles les calculs peuvent être effectués par la suite afin de déterminer les débits massiques sortants et entrants qui permettront de calculer le bilan massique correspondant. Dans ce qui va suivre, seules les vitesses moyennes obtenues dans le tableau 4.12 seront prises en considération pour les différents calculs au niveau des ouvreaux.

Par ailleurs, la comparaison entre les données obtenus au niveau de l'usine et celles au niveau du laboratoire a été effectuée. Dans ce sens, les facteurs de correspondance ont été alors obtenus (en comparant les débits entrants et sortants au niveau de la maquette ainsi qu'à l'usine). Voir tableau 4.13.

Tableau 4.13 : Détermination des facteurs de correspondance – Section de Refroidissement 4

Position de mesure	Débit au niveau de la maquette	Débit au niveau de l'usine	Facteur de correspondance
E	16.19×10^{-4}	2.60×10^{-2}	16.07
F	10.96×10^{-4}	8.04×10^{-2}	73.38
G	11.89×10^{-4}	3.61×10^{-2}	30.38
H	16.08×10^{-4}	3.49×10^{-2}	21.74
Ouvreau 1	18.98×10^{-4}	3.67×10^{-2}	19.37
Ouvreau 2	11.14×10^{-4}	3.87×10^{-2}	34.71
Ouvreau 3	11.81×10^{-4}	4.00×10^{-2}	33.94
Ouvreau 4	6.40×10^{-4}	3.29×10^{-2}	51.40

Le tableau 4.13 indique que pour l'entrée (à savoir la somme des zones E, F, G et H) le facteur de correspondance global moyen est de 35.38. Cela s'ajoute au fait que la modélisation physique d'un écoulement peut être représentative d'un écoulement dans une géométrie bien précise. Ces données (les facteurs de correspondance) peuvent donc être sollicitées dans le cas où il est

nécessaire de déterminer la vitesse de l'écoulement des gaz chauds dans un endroit bien précis de la cloison.

Cependant dans le cas de la maquette, chaque débit calculé représente une moyenne de plusieurs points où les mesures ont été effectuées dans une zone bien déterminée à l'entrée (comme dans le cas de la sortie d'ailleurs). Il est alors indispensable de comparer ces données avec le calcul des débits à la position exacte qui en correspond au niveau de la maquette.

En effet, au niveau de l'usine seules les positions 60cm, 80 cm, 130cm et 170cm à partir du haut de la cloison ont été étudiées. Par analogie, ces positions peuvent correspondre à des points bien précis où la mesure de la vitesse a été effectuée au niveau de la maquette. Les résultats de cette comparaison sont reportés dans le tableau 4.14.

À noter que cette comparaison ne concerne que les données recueillies au niveau de l'entrée.

Tableau 4.14 : Détermination des facteurs de correspondance en considérant la position exacte de mesure de vitesse – Section de refroidissement 4

Position de mesure	Débit au niveau de la maquette	Facteur de correspondance	Débit au niveau de l'usine
E	16.08×10^{-4}	16.07	2.58×10^{-2}
F	11.30×10^{-4}	73.38	8.30×10^{-2}
G	11.99×10^{-4}	30.38	3.64×10^{-2}
H	16.19×10^{-4}	21.74	3.52×10^{-2}
Total			18.04×10^{-2}

Avec un facteur global moyen de 35.39 d'après les résultats du tableau 4.13 il est donc possible de prendre en considération ces données (facteur de correspondance global). Les données de la

maquette y sont plus représentatives car il s'agit d'une moyenne de débits de plusieurs points de mesure pour une même zone.

Connaissant le débit à l'entrée et le débit à la sortie (seulement à partir des ouvreaux) il est possible d'estimer le pourcentage du bilan de masse global pour la section de refroidissement 3 (voir équation 4.1).

Dans ce cas, il est estimé à 82,72%. Bien que cette valeur soit proche de 100% il est à rappeler que pour le calcul, seule la sortie par les ouvreaux a été considérée. L'autre sortie étant l'entrée de la section de refroidissement 3, il est donc possible d'estimer que seulement 17.28% du débit entrant à partir de la section de refroidissement 4 passe vers la section suivante. Ceci étant logique car il y a un soufflage forcée avec les ouvreaux totalement ouverts.

Par ailleurs, la figure 4.29 montre une représentation de la cloison avec les différentes estimations concernant les pourcentages à l'entrée, pertes par les ouvreaux et sortie.

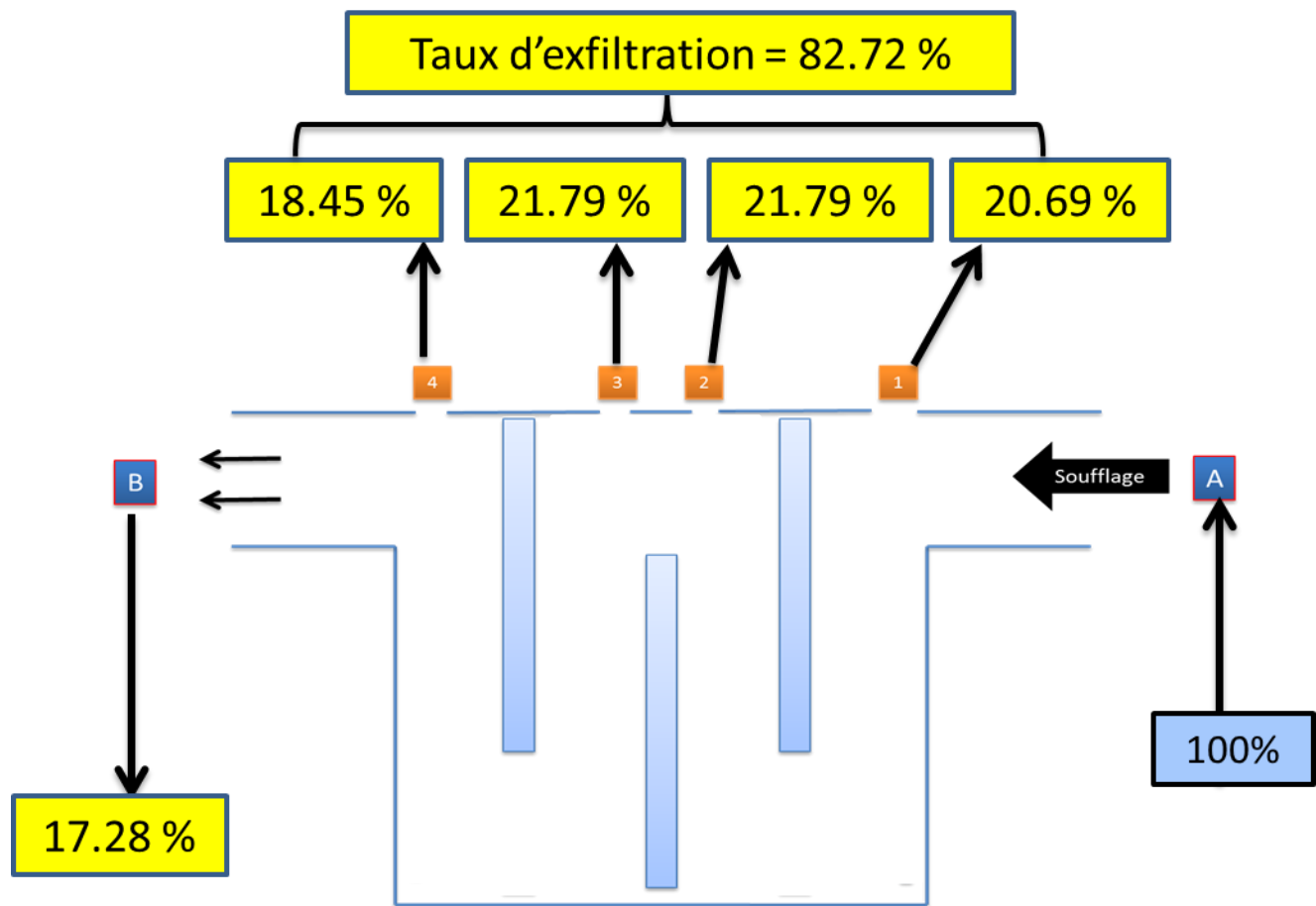


Figure 4.29 : Représentation de la section de refroidissement 4

Bien qu'il ne s'agisse pas des mêmes conditions opératoires (au niveau du laboratoire et au niveau de l'usine), la figure 4.29 indique qu'il en existe des tendances similaires avec la figure 4.23. En effet la tendance des taux d'exfiltration sortants par chaque ouvreau est quasiment la même car plus il y a éloignement de la zone de soufflage plus le taux d'exfiltration diminue. Ceci étant dit que les taux d'exfiltration par les ouvreaux 2 et 3 sont presque du même ordre de grandeur compte tenu de leur proximité l'un avec l'autre et ce même à l'échelle de l'usine. Cependant, au niveau de l'ouveau 1 l'exfiltration est de l'ordre de 20.69% alors que normalement ce pourcentage doit être plus élevé que celui au niveau des autres ouvreaux. Ceci

s'explique par la difficulté au niveau de prise de mesure de vitesses à l'usine se traduisant alors par cette anomalie.

4.7.4 Analyse des résultats pour la section de refroidissement 5

La section de refroidissement 5 est analogue à la section de refroidissement 4 et est caractérisée par une température des gaz chauds relativement peu importante. Les ouvreaux sont totalement ouverts, permettant ainsi un refroidissement rapide des anodes cuites. L'air ainsi sortant de ces ouvreaux est celui provenant du soufflage forcé dans le four de cuisson des anodes. La figure 4.30 indique la position exacte de la section concernée dans le four.

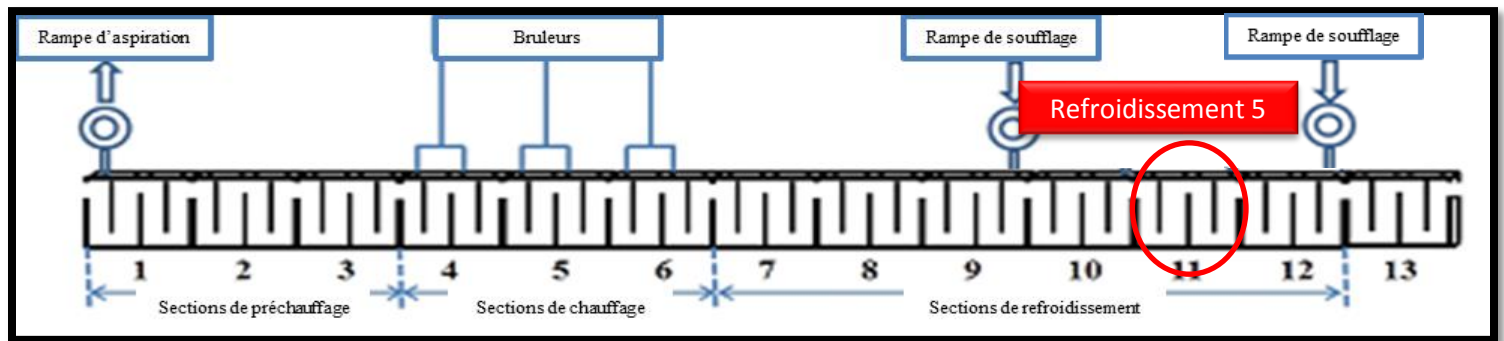


Figure 4.30 : Représentation générale du four de cuisson d'anodes indiquant la section de Refroidissement 5 [9]

Avec des températures de milieu variant entre 140°C et 280°C dans cette section, la mesure des données nécessaires pour l'étude de l'écoulement a été relativement facile par rapport aux sections étudiées précédemment. Ainsi, les températures, les positions et les vitesses d'écoulement ont pu être mesurées dans les zones E, F, G et H de l'entrée ainsi qu'au niveau des ouvreaux 1, 2, 3 et 4, voir figure 4.31.

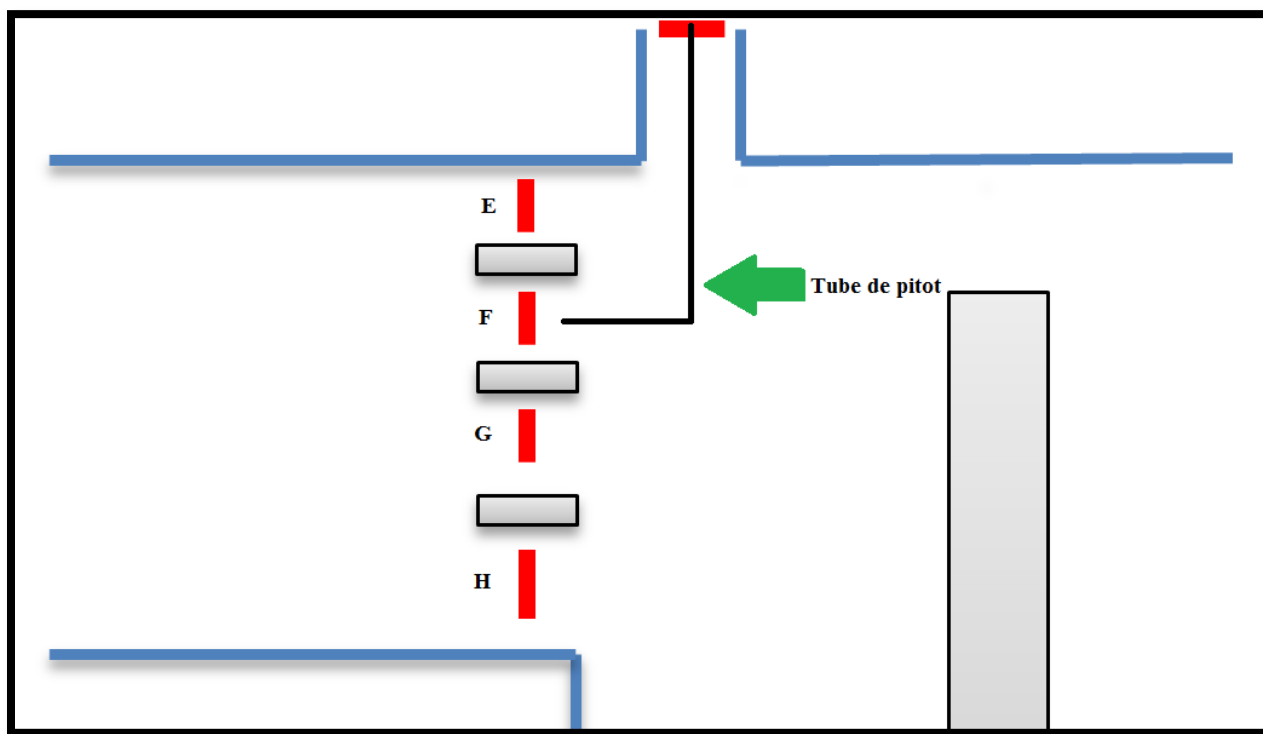


Figure 4.31 : Points de prises de mesures de vitesse pour l'entrée/sortie et au niveau des ouvreaux (avec un tube de Pitot)-Section de refroidissement 5

Suivants ces points de mesure de vitesse (et autres données), les données obtenues sont reportées dans le tableau 4.16 indiquant la position, la vitesse et la température en chaque point ainsi indiqué. Ces données sont, par souci de confidentialité, normalisées et correspondent à des données à 25°C afin d'uniformiser l'étude de toutes les sections. Il est possible de déterminer le débit à l'entrée de la section de refroidissement 5 (par calcul de débit à chaque zone à savoir E, F, G et H) ainsi que le débit sortant par les 4 ouvreaux. Ces deux calculs vont ensuite servir pour déterminer le bilan de masse global ainsi que l'estimation de la quantité d'air sortante (hors ouvreaux) passant vers l'autre section.

Cependant et dans une optique de bien évaluer les données obtenues à l'usine, il est important d'avoir recours à l'hypothèse émise dans la partie de méthodologie à l'usine, à savoir :

- que le régime de l'écoulement à la sortie de chaque ouvrage est turbulent et qu'il est déjà établi bien que la sortie n'est pas de 10 fois la longueur minimale que le diamètre pour l'établissement du régime,
- la vitesse ainsi mesurée correspond à une vitesse maximale nécessaire pour le calcul de la vitesse moyenne suivant l'équation 3.2.

Le calcul des vitesses moyennes pour chaque ouvrage est ainsi reporté dans le tableau 4.15.

Tableau 4.15 : Calcul de la vitesse moyenne de l'écoulement à la sortie des ouvrages – Section de refroidissement 5

Ouvrage	$V_{max} = V_{25^{\circ}C}$	$\frac{V_{moyenne}}{V_{max}}$	$V_{moyenne}$
1	0.50	0.84	0.42
2	0.39	0.84	0.33
3	0.36	0.84	0.30
4	0.25	0.84	0.21

D'après ce tableau, le rapport moyen global de la vitesse moyenne par la vitesse maximale est d'environ 0.84 indiquant ainsi que la vitesse moyenne représente 84% de la vitesse mesurée au niveau de chaque ouvrage à l'usine.

L'hypothèse alors émise a permis de connaître les vitesses avec lesquelles les calculs peuvent être effectués par la suite afin de déterminer les débits massiques sortants et entrants qui permettront de calculer le bilan massique correspondant. Dans ce qui va suivre, seules les vitesses moyennes obtenues dans le tableau 4.15 seront prises en considération pour les différents calculs au niveau des ouvrages.

Par ailleurs, la comparaison entre les données obtenus au niveau de l'usine et celles au niveau du laboratoire a été effectuée. Dans ce sens, les facteurs de correspondance ont été alors obtenus (en comparant les débits entrants et sortants au niveau de la maquette ainsi qu'à l'usine). Voir tableau 4.16.

Tableau 4.16 : Détermination des facteurs de correspondance – Section de Refroidissement 5

Position de mesure	Débit au niveau de la maquette	Débit au niveau de l'usine	Facteur de correspondance
E	16.20×10^{-4}	9.44×10^{-2}	58.30
F	10.96×10^{-4}	12.14×10^{-2}	111.66
G	11.89×10^{-4}	19.34×10^{-2}	161.22
H	16.08×10^{-4}	18.18×10^{-2}	113.10
Ouvreau 1	18.98×10^{-4}	8.41×10^{-2}	44.33
Ouvreau 2	11.15×10^{-4}	6.65×10^{-2}	59.71
Ouvreau 3	11.81×10^{-4}	4.60×10^{-2}	38.90
Ouvreau 4	6.40×10^{-4}	4.11×10^{-2}	64.22

Les données du tableau 4.16 montrent qu'il en existe une importante disparité entre les débits mesurés à l'usine et ceux au niveau de la maquette cloison. Ceci s'explique par la différence des paramètres d'opération. En effet, à l'usine, le soufflage est beaucoup plus important mais aussi il y a une grande influence de la température qui consiste en l'augmentation de la vitesse d'écoulement des gaz chauds. Ces données (les facteurs de correspondance) peuvent donc être sollicitées dans le cas où il est nécessaire de déterminer la vitesse de l'écoulement des gaz chauds dans un endroit bien précis de la cloison. Cependant dans le cas de la maquette, chaque débit calculé représente une moyenne de plusieurs points où les mesures ont été effectuées dans une zone bien déterminée à l'entrée (comme dans le cas de la sortie d'ailleurs). Il est alors

indispensable de comparer ces données avec le calcul des débits à la position exacte qui en correspond au niveau de la maquette.

En effet, au niveau de l'usine, seules les positions 60cm, 80cm, 130cm et 170cm à partir du haut de la cloison ont été étudiées. Par analogie, ces positions peuvent correspondre à des points bien précis où la mesure de la vitesse a été effectuée au niveau de la maquette. Les résultats de cette comparaison sont reportés dans le tableau 4.17. À noter que cette comparaison ne concerne que les données recueillis au niveau de l'entrée.

Tableau 4.17 : Détermination des facteurs de correspondance en considérant la position exacte de mesure de vitesse – Section de refroidissement 5

Position de mesure	Débit au niveau de la maquette	Facteur de correspondance	Débit au niveau de l'usine
E	16.15×10^{-4}	58.30	6.77×10^{-2}
F	11.30×10^{-4}	111.66	12.62×10^{-2}
G	11.99×10^{-4}	161.22	19.34×10^{-2}
H	16.19×10^{-4}	113.10	18.31×10^{-2}
Total			57.04×10^{-2}

Avec un facteur global moyen de 111.07 d'après les résultats du tableau 4.16 il est donc possible de prendre en considération les données (facteur de correspondance global) émanant de la comparaison indiquée dans le tableau 4.16 puisque les données de la maquette y sont plus représentatives car il s'agit d'une moyenne de débits de plusieurs points de mesure pour une même zone.

Connaissant le débit à l'entrée et le débit à la sortie (seulement à partir des ouvreaux) il est possible d'estimer le pourcentage du bilan de masse global pour la section de refroidissement 4 en utilisant l'équation 4.1.

Dans ce cas, il est estimé à 42.60%. Il est à rappeler que pour le calcul, seule la sortie par les ouvreaux a été considérée. L'autre sortie étant l'entrée de la section de refroidissement 4, il est donc possible d'estimer que seulement 57.40% du débit entrant à partir de la section de refroidissement 5 passe vers la section suivante. Ceci étant logique car il y a un soufflage forcée avec les ouvreaux totalement ouverts.

Par ailleurs, la figure 4.32 montre une représentation de la cloison avec les différentes estimations concernant les pourcentages à l'entrée, pertes par les ouvreaux et sortie.

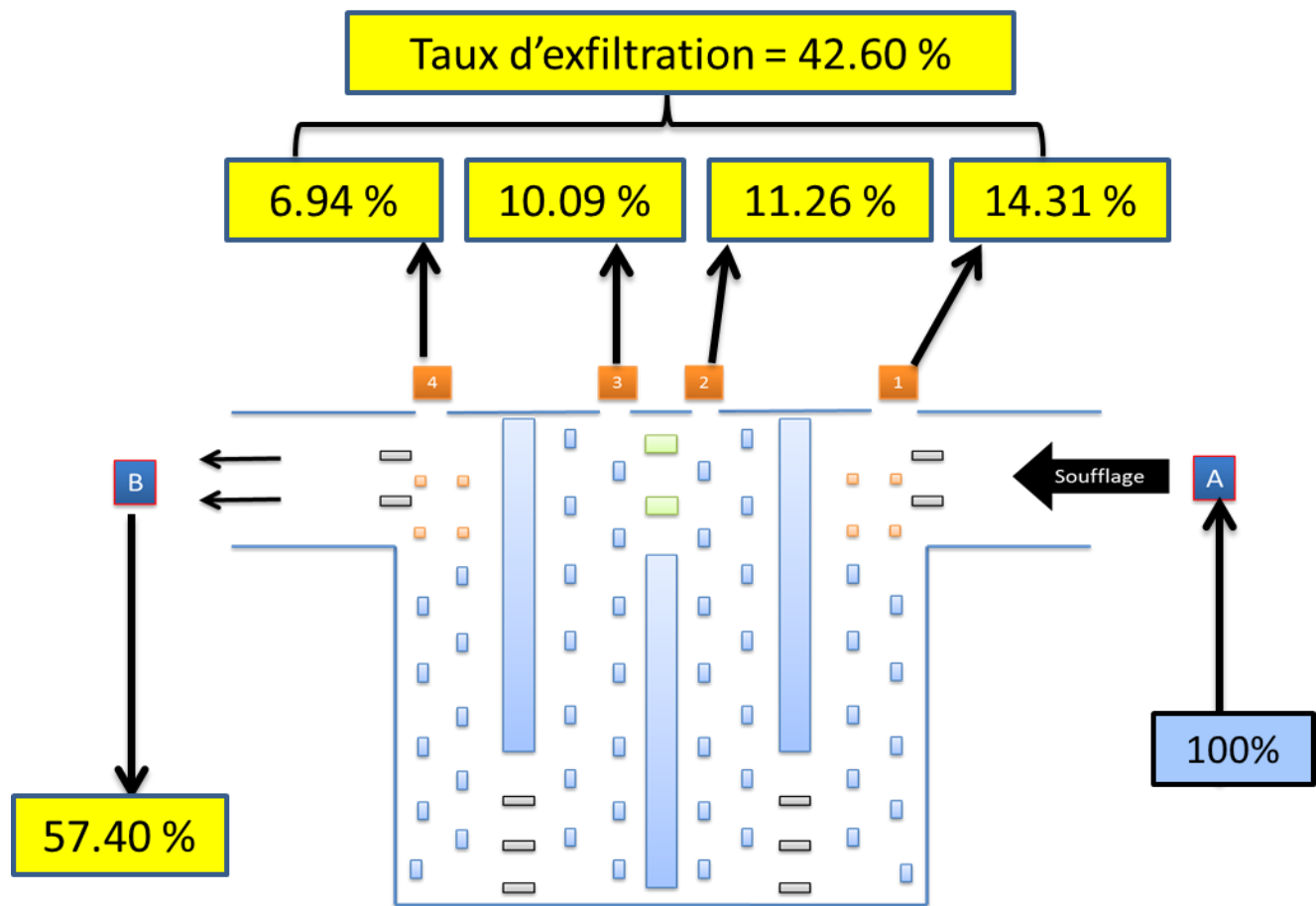


Figure 4.32 : Représentation de la section de refroidissement 5

En comparant la figure 4.33 et la figure 4.23 il est possible d'en déduire qu'il en existe de très grandes similarités par rapport à la tendance du taux d'exfiltration par chaque ouvreau ainsi que le taux d'exfiltration global et par extension le pourcentage de l'air à la sortie (hors ouvreaux).

La tendance est telle que plus c'est proche de la zone de soufflage (l'air entrant à partir de la cloison précédente) plus il y a d'exfiltration. Ainsi, ce taux d'exfiltration diminue au fur et à mesure passant de 14.31% à l'ouvreau 1 à environ 7% à l'ouvreau 4.

4.7.5 Analyse des résultats pour la section de refroidissement 6

La section de refroidissement 6 représente une place importante dans le four de cuisson d'anodes. En effet, elle est le siège du soufflage forcé par l'ouvrage 1. Ce soufflage est nécessaire pour refroidir les anodes cuites le plus possible mais aussi pour faciliter l'accès à la maintenance des briques des murs réfractaires composants la cloison à l'usine. La simulation de l'écoulement a été effectuée à l'échelle du laboratoire ce qui va permettre l'étude et la caractérisation de cette section. La figure 4.33 indique son emplacement exact dans le four de cuisson.

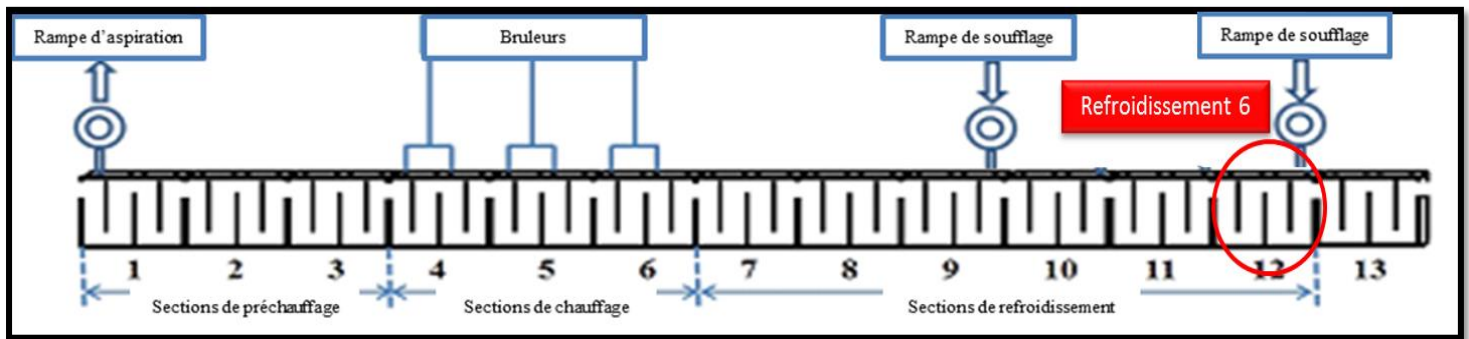


Figure 4.33 : Représentation générale du four de cuisson d'anodes indiquant la section de Refroidissement 6 [9]

Cependant, pour la section de refroidissement 6, il en existe deux entrées et deux sorties à savoir :

- une entrée par le soufflage forcé au niveau de l'ouvrage 1,
- une entrée par force d'entraînement dû au soufflage au niveau de l'entrée principale, donc de l'air ramené de la cloison précédente indiquée par 13 sur la figure 4.33,
- sortie par les ouvrages 2, 3 et 4 car ils sont complètement ouverts,

- *sortie de l'air par la sortie principale à savoir vers la cloison indiquée par 10 dans la figure 4.33.*

Pour l'étude de cette cloison, seuls les données pour l'entrée principale et les sorties par les ouvreaux 2, 3 et 4 ont été mesurées. La sortie de l'air par la sortie principale étant l'entrée de la section de refroidissement 4. Ainsi, à l'issue de cette étude il sera possible d'estimer la quantité d'air ramenée de l'extérieur par le soufflage forcé.

Avec des températures de milieu variant entre 50°C et 110°C dans cette section, la mesure des données nécessaires pour l'étude de l'écoulement a été relativement facile par rapport aux sections de refroidissement 2 ou 3. Ainsi, les températures, les positions et les vitesses d'écoulement ont pu être mesurées dans les zones E, F et H (l'entrée par G est à estimer grâce à la détermination des facteurs de correspondance adéquat) de l'entrée ainsi qu'au niveau des ouvreaux 2, 3 et 4, voir figure 4.34.

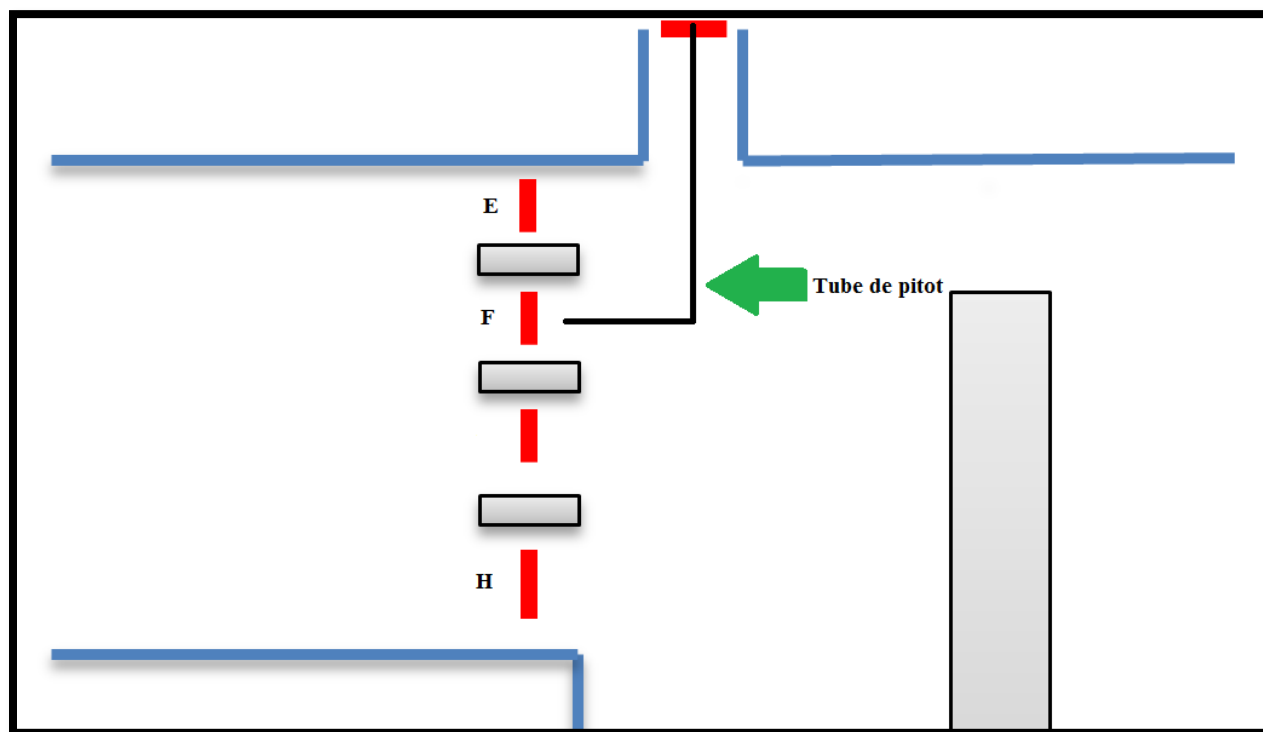


Figure 4.34 : Points de prises de mesures de vitesse pour l'entrée/sortie et au niveau des ouvreaux (avec un tube de Pitot)-Section de refroidissement 6

Suivants ces points de mesure de vitesse (et autres données), les données obtenues sont reportées dans le tableau 4.19 indiquant la position, la vitesse et la température en chaque point ainsi indiqué. Ces données sont, par souci de confidentialité, normalisées et correspondent à des données à 25°C afin d'uniformiser l'étude de toutes les sections. Il est possible de déterminer le débit à l'entrée de la section de refroidissement 6 (par calcul de débit à chaque zone à savoir E, F, G et H de l'entrée) ainsi que le débit sortant par les ouvreaux 2, 3 et 4. Ces deux calculs vont ensuite servir pour déterminer le bilan de masse global ainsi que l'estimation de la quantité d'air entrante par l'ouvrage 1 par soufflage forcé. Cependant, le calcul de la vitesse réelle du débit sortant de chaque ouvrage est nécessaire. En effet, comme expliqué dans la partie de méthodologie à l'échelle de l'usine, ce calcul est important compte tenu de la nature du régime

(turbulent) à la sortie des ouvreaux. Ce régime n'étant pas totalement établi, le calcul de la vitesse moyenne qui prend compte de la position de mesure à la sortie de l'ouveau au niveau de l'usine. En l'occurrence, dans notre cas, au milieu de la sortie. Les calculs obtenus sont alors rapportés dans le tableau 4.18.

Tableau 4.18 : Calcul de la vitesse moyenne de l'écoulement à la sortie des ouvreaux – Section de refroidissement 6

Ouvreau	$V_{max} = V_{25^{\circ}C}$	$\frac{V_{moyenne}}{V_{max}}$	$V_{moyenne}$
2	1	0.85	0.85
3	0.86	0.85	0.73
4	0.68	0.85	0.58

D'après ce tableau, le rapport moyen global de la vitesse réelle par la vitesse maximale est d'environ 0.85 indiquant ainsi que la vitesse moyenne représente 85% de la vitesse mesurée au niveau de chaque ouveau à l'usine.

L'hypothèse alors émise a permis de connaître les vitesses avec lesquelles les calculs peuvent être effectués par la suite afin de déterminer les débits massiques sortants et entrants qui permettront de calculer le bilan massique correspondant. Dans ce qui va suivre, seules les vitesses moyennes obtenues dans le tableau 4.18 seront prises en considération pour les différents calculs au niveau des ouvreaux.

Une comparaison entre les données obtenus au niveau de l'usine et celles au niveau du laboratoire a été effectuée. Dans ce sens, des facteurs de correspondance ont été alors obtenus (en comparant les débits aux zones E, F et H de la maquette ainsi qu'à l'usine). Voir tableau 4.19.

Tableau 4.19 : Détermination des facteurs de correspondance – Section de Refroidissement 6

Position de mesure	Débit au niveau de la maquette	Débit au niveau de l'usine	Facteur de correspondance
E	6.52×10^{-4}	5.28×10^{-2}	81.00
F	10.51×10^{-4}	7.58×10^{-2}	72.07
H	14.90×10^{-4}	3.73×10^{-2}	25.04
Ouvreau 2	29.25×10^{-4}	16.97×10^{-2}	58.03
Ouvreau 3	27.37×10^{-4}	14.57×10^{-2}	53.23
Ouvreau 4	12.58×10^{-4}	11.41×10^{-2}	90.80

Au niveau de la maquette cloison, chaque débit calculé représente une moyenne de plusieurs points où les mesures ont été effectuées dans une zone bien déterminée à l'entrée (comme dans le cas de la sortie d'ailleurs). Il est alors indispensable de comparer ces données avec le calcul des débits à la position exacte qui en correspond au niveau de la maquette et ainsi pouvoir estimer le débit dans la zone d'écoulement G (celle qui n'a pas été mesurée à l'usine).

En effet, au niveau de l'usine seules les positions 60cm, 70cm, 100cm, 150cm et 160cm à partir du haut de la cloison ont été étudiées. Par analogie, ces positions peuvent correspondre à des points bien précis où la mesure de la vitesse a été effectuée au niveau de la maquette. Les résultats de cette comparaison sont reportés dans le tableau 4.20.

Tableau 4.20 : Détermination des facteurs de correspondance en considérant la position exacte de mesure de vitesse – Section de refroidissement 6

Position de mesure	Débit au niveau de la maquette	Facteur de correspondance	Débit au niveau de l'usine
E	6.53×10^{-4}	81.00	5.47×10^{-2}
F	10.52×10^{-4}	72.07	7.42×10^{-2}
H	14.90×10^{-4}	25.04	3.70×10^{-2}

Le tableau 4.19 indique un facteur global moyen de 59.37 il est donc possible de prendre en considération les données (facteur de correspondance global) émanant de la comparaison indiquée dans le tableau 4.19 puisque les données de la maquette y sont plus représentatives car il s'agit d'une moyenne de débits de plusieurs points de mesure pour une même zone.

Toutefois, d'après les résultats indiqués dans le tableau 4.19, il est possible de déterminer un facteur de correspondance global moyen permettant ainsi le calcul des débits dans la zone G et par conséquence déterminer le débit global entrant dans la section de refroidissement 6.

Le facteur global émanant est de l'ordre de 59.37. L'estimation des débits dans la zone G est alors possible et est rapportée dans le tableau 4.21.

Tableau 4.21: Estimation des débits et du débit global entrant dans la section de refroidissement 6

Position de mesure	Débit au niveau de la maquette	Débit au niveau de l'usine	Débit estimé au niveau de l'usine	Débit global estimé à l'usine
E	6.53×10^{-4}	5.47×10^{-2}	-	0.25
F	10.52×10^{-4}	7.42×10^{-2}	-	
G	13.95×10^{-4}	-	8.28×10^{-2}	
H	14.90×10^{-4}	3.70×10^{-2}	-	

D'après les tableaux 4.19 et 4.21 ainsi que les résultats de l'étude de la section de refroidissement 5, il est possible de déduire que :

- *le débit entrant dans la section de refroidissement 6 par force d'entraînement est égale à 0.25,*
- *le débit sortant de la section de refroidissement 6 par les ouvreaux 2, 3 et 4 est égale à 0.42,*
- *le débit des gaz chauds sortants par la sortie principale (vers la section de refroidissement 5) est égal à 0.57,*

Il est donc possible avec ces données de calculer le débit total sortant de la section de refroidissement 6 à savoir le débit sortant par les ouvreaux 2, 3 et 4 ainsi que le débit entrant dans la section de refroidissement 5 :

- *le débit total sortant est donc : 1*

Connaissant le débit entrant par la force d'entraînement dû au soufflage, il est possible d'estimer le débit de soufflage par l'ouvrage 1, si l'on considère que le bilan massique est de 100% :

- *le débit entrant par soufflage est donc : 0.75*

Dans ce sens, tous les débits entrants et sortants ayant été déterminé, il est possible d'estimer les taux d'exfiltration. Voir figure 4.35.

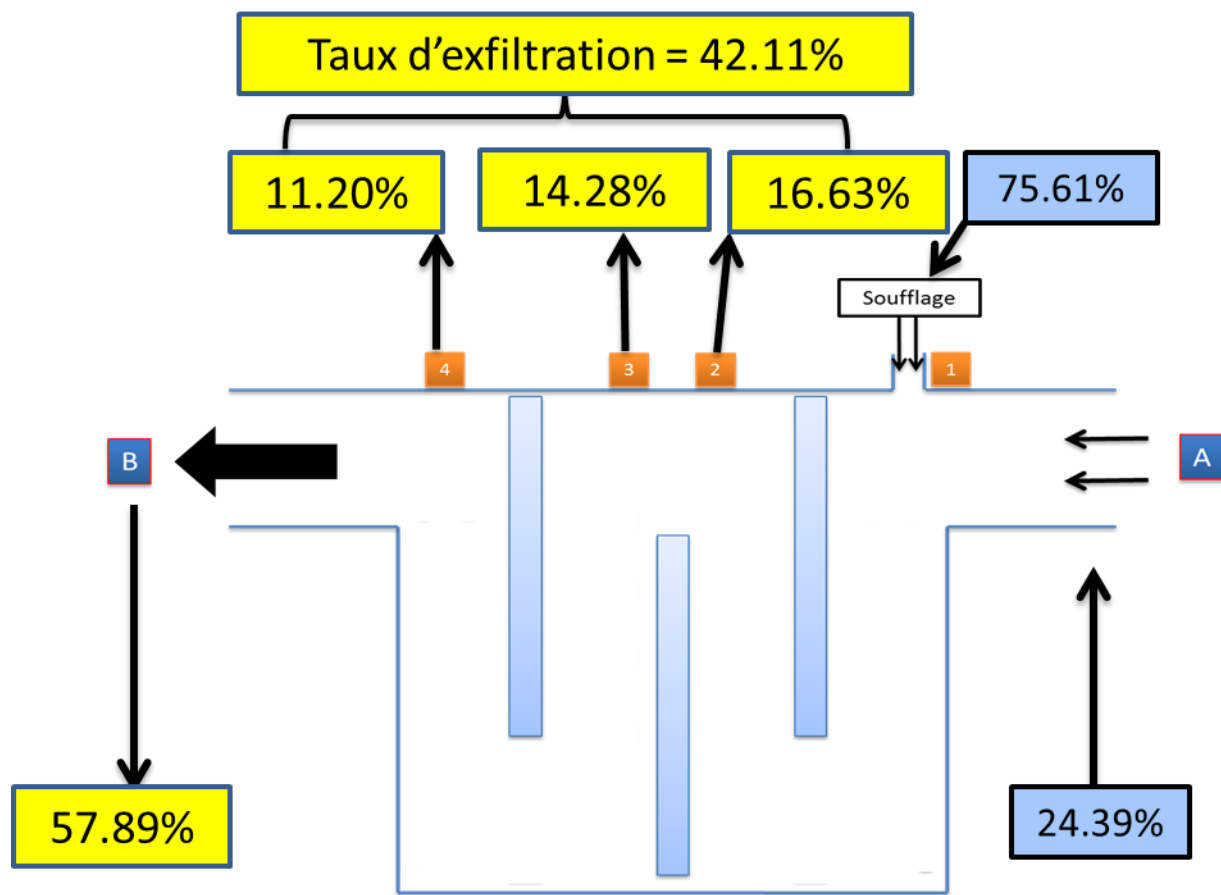


Figure 4.35 : Représentation de la section de refroidissement 6

Par analogie avec les résultats obtenus dans la figure 4.33, il est possible de déduire que les tendances pour les travaux à l'usine et ceux au niveau de la maquette cloison se concordent permettant ainsi de déduire qu'il est possible d'estimer les débits entrants/sortants ainsi que les pertes par exfiltration (ou infiltration dans d'autres cas) dans un four de cuisson d'anodes.

Le taux d'exfiltration diminue au fur et à mesure que la distance entre l'ouverture et la zone de soufflage augmente. Environ un quart du débit entrant dans la section de refroidissement 5 provenant de la cloison de maintenance par force d'entraînement.

4.8 Conclusions

Dans ce chapitre, les résultats obtenus ont permis tout d'abord de conclure qu'il est possible de reproduire une cloison d'un four de cuisson d'anodes à l'échelle du laboratoire. Cette reproduction est bien entendu vérifiable par la modélisation mathématique rendant ainsi possible son exploitation pour différentes mesures expérimentales. Les travaux qui peuvent être effectués au niveau de cette maquette cloison ont permis non seulement de simuler l'écoulement mais aussi d'estimer les infiltrations et exfiltrations au niveau d'une cloison mais aussi la mesure des débits. Une correspondance méticuleuse de ces données avec des données pouvant être recueillies à l'usine de production d'anodes a permis l'estimation des débits au niveau de l'usine.

Chapitre 5

Conclusions et recommandations

5.1 Conclusions

Dans une optique de caractérisation de l'écoulement dans le four horizontal de cuisson d'anodes, des travaux et expérimentations ont été effectués durant ce projet de maitrise. La mise au point d'un protocole expérimentale, avec la méthodologie développée dans ce document, a été testée et validée dans l'usine de fabrication d'anode dans le but d'atteindre les objectifs du projet.

La caractérisation et l'étude en général sur l'écoulement dans le four horizontal de cuisson d'anode peuvent permettre non seulement d'identifier, de quantifier et de mesurer les différents paramètres d'opération mais aussi de pouvoir améliorer ces derniers. Dans ce sens, il est à noter qu'il n'existe encore pas de travaux qui traitent ce type de sujets.

Les travaux sur la maquette cloison développée à l'échelle du laboratoire ont permis d'obtenir des bilans massique globaux généralement satisfaisants permettant entre autre de déterminer le taux d'exfiltration et d'infiltration suivant le cas étudié et/ou simulé par cette modélisation physique. Des simulations de plusieurs sections du four de cuisson d'anodes ont pu donc être effectuées.

À l'issu des travaux à l'échelle du laboratoire, d'autres travaux ont pût être effectués au niveau de l'usine de fabrication d'anodes. Des mesures ont permis de caractériser et d'effectuer l'étude de l'écoulement des gaz chauds dans les sections du four où les mesures ont été possibles.

Les données ainsi recueillis ont été comparées avec ceux obtenus avec la maquette cloison permettant la détermination d'un facteur de correspondance global pour chaque cas ou section étudiée. Ces facteurs de correspondance sont déterminant afin de simuler le comportement de l'écoulement au niveau du laboratoire mais aussi d'avoir une idée sur l'écoulement dans des zones ou sections du four où les mesures n'ont pas été possible vu les conditions du milieu.

5.2 Recommandations

Suivant cette étude sur un four horizontal de cuisson d'anodes certaines recommandations peuvent être prisent en considération. L'arrangement de la géométrie de la cloison maquette ou à l'échelle d'une usine de production d'anodes affecte significativement le sens et la manière avec laquelle les gaz s'écoulent. À savoir toute donnée pouvant être recueillie en travaillant avec des géométries différentes (réarrangement des briques et entretoises et/ou le nombre de rangées de briques) amènera à une analyse technique différente en prenant compte de tous les paramètres opératoires. Parallèlement, il est recommandé de faire plusieurs compagne de mesure (mesure de vitesses d'écoulement, de ΔP , de températures) à l'échelle de l'usine afin d'établir une base données fiable et plus précises permettant de comparer avec les données expérimentales qui peuvent être recueillies au niveau des travaux au laboratoire. Aussi, le suivi d'un ou plusieurs cycles de cuisson (compagnes de mesure par cycle) dans l'usine de cuisson d'anodes pourrait

être pertinent car il faut toujours prendre compte des paramètres et des conditions établi par les opérateurs suivant chaque cycle.

Références

- [1] Sverdrupa H.U., Vala Ragnarsdottir K., Kocaefe D., "Aluminium for the future: Modelling the global production, market supply, demand, price and long term development of the global reserves", Resources, Conservation and Recycling 103, 2015, 139-154
- [2] Charrette A., Kocaefe D., "Le carbone dans l'industrie de l'aluminium", 2012, Les presses de l'aluminium, Chicoutimi, Canada
- [3] Smirnov, V.S., "Alumina production in Russia", Part 1, 1996, Historical background, JOM 48, 24–26
- [4] Wikipédia (En), «Aluminium,» 21 mars 2014.
- [5] Keller F., Sulger P.O., "Anode Baking", 2ème édition, 2008, R&D Carbon Ltd, Suisse
- [6] Al Hosni S., Chandler J., Forato O., Morales F., Bigot J., Jonville C., "Sohar aluminium's anode baking furnace operation", Light Metals, 2011, 859-863
- [7] Hulse K.L., Anode Manufacture, 1ère édition, 2000, R&D Carbon Ltd, Suisse
- [8] Lustenberger M., "Heat treatment of carbon anodes for the aluminium". Diploma thesis in process engineering, Swiss Federal Institute of Technology Zurich and R&D Carbon Ltd, Sierre, 2004.
- [9] www.fontes-refractories.com, 29 août 2016
- [10] Kocaefe Y.S., Oumarou N., Baithèche M., Kocaefe D., Morais B., Gagnon M., "Use of mathematical modeling to study the behavior of a horizontal anode baking furnace", Light Metals, 2013, 1139-1144
- [11] Keller F., Disselhorst J.H.M., "Modern anode bake furnace developments", Light Metals, 1981, 486-491
- [12] Dagoberto S., Gusberti V., Sugler P., Keller F., Meie M., "Recent developments in anode baking furnace design", Light Metals 2011, 853-858
- [13] Beach D., Coetzee R., Lyle M., Fantin D., Gay H., Mahieu P., "Proven control philosophy and operation for anode baking process", Light Metals 2007, 953-957

- [14] Keller F., Dr. Mannweiler U., Severo D., "Computational Modeling in Anode Baking", R&D Carbon Ltd., Sierre, Switzerland, 2006
- [15] Maiwald D., Leisenberg W., "The development of anode baking technology from past to future", Light Metals 2007
- [16] Mahieu P., Neple S., Fiot N., Ofico I., Eufrazio M., "High performance sealing for anode baking furnaces", Light Metals 2011, 881-885
- [17] Miotto P., Silva M., Kato C., Silva R., "New method to start up fires in baking furnaces", Light Metals 2005, 683-688
- [18] Zhang L., Zheng C., Xu M., "Simulating the Heat Transfer Process of Horizontal Anode Baking Furnace", The National Laboratory of Coal Combustion, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei, China, Dev. Chem. Eng. Mineral Process., 12(3/4), 427-440, 2004.
- [19] Maiwald D., Leisenberg W., Prof. Dr. Leisenberg I., "Flue condition index – a new challenge to increase flue lifetime, operational safety and fuel efficiency in open pit anode", Light Metals 2006, 553-560
- [20] Carroll J., Grobbelaar A.P., "Refractories for anode baking furnaces", Light Metals, 1981, 543-567
- [21] Tiba P.R.T., Teider B.H., Figueiredo F., Gallo J.B., Pandolfelli V.C., "Systemic analysis of flue wall bricks used on anode baking furnaces", Light Metals, 2010, 1015-1019
- [22] Piffer V., Miotto P., Kato C., Meier M., Perruchoud R., Sulger P., "Process Optimization in Bake Furnace", Light Metals 2007, 959-964
- [23] Keller F., Sulger P.O., Dr. Meier M.W., Severo D.S., Gusberti V., "Specific energy consumption in anode bake furnaces", Light Metals, 2010, 1005-1010
- [24] Ordronneau F., Gendre M., Pomerleau L., Backhouse N., Berkovich A., Huang X., "Meeting the challenge of increasing anode baking furnace productivity", Light Metals, 2011, 865-870
- [25] Chen E.S., "Thermomechanical study of a flue wall in a carbon baking furnace", TDI report, 1994
- [26] Chen E.S., Nelson B.R., Patel B., "Thermomechanical improvement of a flue wall in anode baking furnace", UNITECR'95 Congress, Vol 3, 1995, 432-439

- [27] Document Dantec "Streamline" (1999), n°194-111-02.
- [28] Rex Klopfenstein Jr., "Air velocity and flow measurement using a Pitot tube", ISA Transactions 37, 1998, 257-263
- [29] White F.M., "Fluid Mechanics", 4ème edition, 1999, The McGraw-Hill Companies Inc
- [29] David H.F, Liu, Bela G.Liptak., "Environmental Engineers' Handbook", 1999
- [30] Normes internationales définies par American Society for Testing and Materials (ASTM)
- [31] Baitheche, M., "Développement d'un modèle transitoire en 3d du four horizontal de cuisson d'anodes en carbone", thèse de doctorat, Université du Québec à Chicoutimi, 2015.